

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**

***ESTUDIO Y MEJORA DE UN
MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN
DE UN MÉTODO DE DETECCIÓN DE
ISLANDING PASIVO (IDM) BASADO EN LA
MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS***

Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Eléctrica



Julia Merino Fernández

Abril 2012

0 - OBJETIVOS

Las microrredes son agrupaciones de fuentes de generación distribuida, cargas y elementos almacenadores de energía, que pueden actuar individualmente o conectadas a una red mayor. Debido a que presentan una serie de ventajas se están implantando de forma progresiva y creciente en los sistemas eléctricos de potencia. Son sistemas totalmente autónomos y, por ello, altamente flexibles.

Ante una situación anómala que pueda producirse en la red principal, ya sea un fallo eléctrico, una disrupción física en la topología o una subida desproporcionada de precio, la microrred debe ser capaz de detectar esa situación y desconectarse a fin de poder protegerse.

La situación de islanding se produce cuando por cualquier circunstancia hay una pérdida de la red principal y la microrred queda operando de forma aislada. Los métodos anti-islanding, que ayudan a la detección del fenómeno en las microrredes y a la desconexión de las mismas presentan dificultades a la hora de realizar esa tarea en determinados puntos del plano P-Q.

Con este trabajo fin de Máster se pretende profundizar en el conocimiento y aplicabilidad de los métodos de detección de islanding extendidos a microrredes. Se analiza la viabilidad del microinterruptor inteligente diseñado por los investigadores de la Universidad de Wisconsin - Madison para desarrollar la función de detección y actuación ante una situación de islanding inintencionado. A continuación se realiza un estudio de armónicos en el punto de

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

conexión entre la red principal y la microrred. Por último se utilizan los resultados de este análisis para implementar y validar un nuevo método pasivo de detección de islanding en el microinterruptor basado en la medida y monitorización del nivel de tensión de 5º armónico en el PCC.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Microrredes. Definición y estructura

Una microrred es un sistema eléctrico de potencia de pequeño o mediano tamaño compuesto por un sistema de generación distribuida y que puede operar, tanto de forma aislada como interconectado a una red mayor. Además de las microfuentes de generación en las microrredes hay integradas diferentes cargas, sistemas autónomos de control, que posibilitan la gestión dentro de la propia instalación y elementos para permitir la interconexión a la red principal. Una parte importante de las fuentes de generación integradas en estas redes están controladas por sistemas electrónicos de potencia a fin de poder disponer en cada instante de un control completo y seguro de la red, que permita dotar al conjunto de una mayor flexibilidad.

Ante una situación anómala, ya sea un fallo en la red principal, un colapso de tensión o una subida de precios, la microrred debe desconectarse. Con ello se evita que la alimentación a la carga provenga solamente de la microrred. Si esto ocurre, el operador del sistema pierde el control y la observabilidad sobre esa área y no puede garantizar a los clientes un suministro de energía con las condiciones de calidad exigidas.

Las microrredes presentan una serie de ventajas y por ello se han convertido en uno de los temas de estudio clave en el campo de la ingeniería eléctrica. La primera de estas virtudes es que proporcionan al consumidor energía tanto de tipo eléctrica como calorífica, mejorando el rendimiento global de la instalación. Su uso fomenta la utilización de energías renovables y, consecuentemente, se reducen las emisiones ligadas a los combustibles fósiles. Las microrredes contribuyen además a la disminución de costes,

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

permitiendo al operador del sistema un control más exacto de la energía generada. El uso de tecnologías de generación distribuida proporciona una reducción importante de las pérdidas en las líneas de transporte y distribución.

Para la implantación masiva y eficiente de microrredes en los sistemas eléctricos de potencia, es necesario afrontar una serie de retos tecnológicos. El primero de ellos es la dificultad para incorporar la información necesaria en los estimadores de estado de los sistemas eléctricos que garantice la actuación segura del sistema. La coordinación de un gran número de fuentes de generación distribuida es compleja. Actualmente, se está trabajando en la mejora de los sistemas de comunicación entre las distintas fuentes y los operadores de los sistemas eléctricos. Así mismo, es complicado el proceso de diseño de todos los sistemas de control asociados a las fuentes ya que deben presentar las capacidades principales de control sobre la tensión, la frecuencia y el cabalgamiento de hueco. Otro de los retos asociados a la implantación de microrredes es el desarrollo de microinterruptores con control avanzado para la conmutación rápida y eficaz entre el funcionamiento de la microrred en modo aislado o conectada a la red principal.

Los retos tecnológicos planteados son sin duda un motivo claro para que las microrredes no estén aún extendidas de forma masiva, pero no es, sin embargo, la razón principal. El gran problema actual de las microrredes es la falta de legislación específica que regule su comportamiento y las condiciones que deben cumplir en el punto de conexión a la red principal. Sobre este punto se entrará en detalle más adelante.

Aunque es importante en una microrred la coordinación que exista entre las cargas y la generación para que en régimen permanente el

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

comportamiento del sistema sea el adecuado, son las exigencias de respuesta en régimen transitorio las que definen tres posibles estructuras [1]:

Tipo 1: Entidad principal "virtual"

En esta estructura, un órgano de control central toma muestras de todas las variables de estado y envía las señales a las microfuentes por medio de los sistemas de telecomunicaciones. Toda la generación queda virtualmente agrupada en un único generador equivalente que controla la actuación de toda la microrred. El problema principal que presenta esta configuración es que el funcionamiento de toda la red se confía a un único sistema de telecomunicaciones, por lo que hay que garantizar que este sistema es fiable y seguro.

Tipo 2: Entidad principal "real"

En este segundo esquema, hay un elemento central físico en la microrred que gobierna a la misma. Puede ser un generador, pero también puede ser un sistema de almacenamiento. Esta unidad controla los flujos de potencia y el comportamiento en régimen transitorio de la microrred. La problemática asociada a esta segunda estructura es evidente. La unidad central tiene un coste muy elevado y la fiabilidad de la misma es un punto clave en el diseño.

Además, es difícil dimensionar el tamaño de la unidad y de su estructura mecánica asociada, ya que la microrred puede sufrir cambios tanto en la generación instalada como en la carga conectada en cualquier momento y el conjunto debería ser fácilmente ampliable.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Tipo 3: Control distribuido

En esta última estructura cada unidad que forma parte de la microrred lleva su propio control asociado, que garantiza tensión y frecuencia adecuadas en el punto de conexión. Suele existir también un sistema central, redundante, que envía a las unidades una serie de valores de control (valores en régimen permanente). Es necesario asegurar la rapidez de respuesta en el sistema por lo que las conexiones entre las unidades y la microrred suelen ser por medio de la electrónica de potencia. Como es bien sabido, la electrónica de potencia proporciona esa respuesta rápida requerida, si bien es cierto que introduce armónicos adicionales y que puede hacer que el sistema sea más sensible ante perturbaciones. Por último, una estructura tipo 3 necesita un diseño que permita equilibrar la generación y carga durante los procesos de conexión y desconexión de la microrred a la red principal para que las perturbaciones ligadas a estos procesos sean aceptables.

La microrred física utilizada para el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster y de la que se hablará con más detalle en el apartado 3, pertenece a este último tipo.

1.2 Islanding

Desde el punto de vista eléctrico, una isla es una agrupación formada por, al menos, una fuente de generación que alimenta a una o más cargas locales sin estar conectada a ninguna red eléctrica de tamaño superior.

El fenómeno de islanding se produce cuando la microrred sigue alimentando a la carga una vez que se ha perdido la red principal como consecuencia de algún fenómeno anómalo. De esta manera, la carga sigue

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

energizada, pero el sistema de control central ve a la "isla" como una porción del sistema que es no observable. El operador del sistema pierde en ese instante la capacidad de control sobre el área. Ante una situación como esta, la acción primaria de seguridad es desconectar la microrred en un tiempo inferior a 2 segundos [2]

Hay una gran cantidad de razones por las que el fenómeno de islanding debe ser detectado y la microrred tiene que ser desconectada. Por supuesto, el hecho de que la energía que se suministra a los clientes tenga que ser de calidad y sin comprometer la seguridad del sistema y eso no puede garantizarse. Pero aunque este motivo es el más evidente, no es el único. En un caso de islanding, las fluctuaciones producidas en la tensión y en la frecuencia pueden causar daños a los equipos eléctricos conectados siendo la compañía eléctrica la responsable subsidiaria ante estos daños. Además hay riesgo para los trabajadores de la red y para los propios usuarios, ya que, en principio, una zona que debería estar desenergizada está siendo alimentada desde la microrred. El sistema que ha quedado aislado puede acabar puesto a tierra de manera inadecuada a través de las tierras de las microfuentes. Si no hay un control sobre el microinterruptor, cuando vuelve la red principal puede aparecer una diferencia de ángulos importante entre los fasores de tensión de la red principal y la microrred, que se traduzca en grandes pares pulsantes. Estos pares pueden afectar a los generadores y durante los transitorios la tensión en el nudo puede llegar a triplicarse.

1.3 Marco normativo. El estándar 1547

Aunque son varias las razones técnicas que limitan la expansión rápida de las microrredes en los sistemas eléctricos de potencia y que se han

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

mencionado en un apartado anterior, sin duda el gran problema que frena ese desarrollo es la falta de legislación específica.

El estándar 1547 así como toda la normativa que pueda girar en torno a la conexión de GD y detección del islanding, tiene su origen en la necesidad de integrar las fuentes de tipo fotovoltaico y sus inversores en los sistemas de potencia. El estándar recoge, por tanto, la extensión de los conceptos que por primera vez se presentaron en la industria fotovoltaica al resto de fuentes de generación distribuida.

El 1547 es una norma de publicación relativamente reciente (2003) que está aún en fase de desarrollo. La falta de normativas comunes a todos los países en lo que concierne a la temática que aborda el estándar hace que, entre los expertos, haya una mayor dificultad a la hora de llegar a acuerdos y que el proceso de implantación de la normativa se esté viendo ralentizado.

A continuación se muestra una relación del conjunto de estándares que están englobados en el IEEE 1547. Como se puede observar, sólo cuatro están aprobados en la actualidad mientras que el resto se encuentra en fase de borrador.

*1547.1 Procedimientos de pruebas de equipos para la interconexión de generación distribuida a la red eléctrica. **Julio 2005***

*1547.2 Guía de aplicación del estándar 1547 para la conexión de la generación distribuida a los sistemas de energía eléctrica. **Diciembre 2008***

*1547.3 Guía para la monitorización del intercambio de información y el control de la generación distribuida en los sistemas de energía eléctrica. **Octubre 2007***

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

1547.4 Guía para el diseño, operación e integración de los sistemas eléctricos de generación distribuida aislados con los sistemas de energía eléctrica. Junio 2011

1547.5 Guía técnica para la conexión de fuentes eléctricas de potencia superior a 10MW a la red de transporte. Borrador

1547.6 Guía de prácticas recomendadas para la conexión de generación distribuida a las redes de distribución. Borrador

1547.7 Desarrollo de estudios sobre la conexión de generación distribuida. Borrador

1547.8 Guía de prácticas recomendadas para establecer métodos y procedimientos que provean soporte para la implementación de estrategias para el uso extendido del estándar. Borrador

La norma que regula el comportamiento de las microrredes y que regula cómo deben ser las pruebas que validen una microrred ha sido aprobada en el año 2011 (estándar 1547.4). Tiene gran importancia ya que se trata de la primera normativa que aborda los aspectos ligados al diseño, al modo de operación y a la integración de las microrredes en los sistemas eléctricos de potencia y está aún en fase de implantación. En él aparecen recogidas las condiciones de funcionamiento para cada uno de los modos de operación:

- Funcionamiento en paralelo con la red principal
- Transición desde el funcionamiento en paralelo al funcionamiento en isla
- Funcionamiento en isla

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Los límites máximos de funcionamiento aceptados en cada uno de los modos de operación de la microrred son los establecidos en el estándar 1547. En las tablas 1, 2 y 3 se muestran estos requisitos. La tabla 1 muestra los límites permitidos para las fluctuaciones de tensión. En la primera columna, aparece el porcentaje sobre el valor eficaz de la tensión de fase y en la segunda el tiempo de despeje, o, lo que es lo mismo, el tiempo en que debe haber actuado el interruptor para desconectar la microrred. En la segunda tabla, se precisan los márgenes de operación para la frecuencia y en la tercera, los niveles máximos de distorsión armónica, en tanto por ciento, en función del orden del armónico.

Tensión (% sobre el valor eficaz)	Tiempo de despeje (s) - DR < 30 kW
$V < 50$	0.16
$50 \leq V < 88$	2
$110 < V < 120$	1
$V \geq 120$	0.16

Tabla 1. Límites de tensión según el IEEE 1547

Potencia de la GD	Rango de frecuencia (Hz)	Tiempos de despeje (s)
$P \leq 30 \text{ kW}$	> 60.5	0.16
	< 59.3	0.16
$P > 30 \text{ kW}$	> 60.5	0.16
	$< \{59.8 - 57\} \text{ Hz}$	Ajustable de 0.16 a 300
	< 57	0.16

Tabla 2. Límites de respuesta en frecuencia en el IEEE 1547

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Orden del armónico impar	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \leq 35$	Distorsión total de demanda (TDD)
Porcentaje (%)	4	2	1.5	0.6	0.3	5
Los niveles de armónicos pares son el 25% de los niveles de armónicos impares especificados arriba						

Tabla 3. Máximos niveles de armónicos

Por supuesto, todos los métodos para detección del islanding deben cumplir con los tiempos de apertura del interruptor indicado. Como resumen se puede concluir que el procedimiento IEEE 1547 tiene tanta importancia por marcar, por primera vez, una serie de límites de funcionamiento que son de aplicación en todo el territorio de los EEUU y dentro de él, el 1547.4 es la primera normativa específica para la gestión de las microrredes.

2. MÉTODOS DE DETECCIÓN DEL ISLANDING

La filosofía principal asociada a los métodos de detección del islanding (en inglés Islanding Detection Methods y, desde ahora, nombrados IDMs) estriba en la medida y monitorización de variables asociadas a las fuentes, a fin de determinar, en base a un cambio de esos parámetros si el sistema se encuentra en situación de islanding. Las magnitudes habituales a registrar son: tensiones en los distintos nudos, corrientes, frecuencia y tasa de distorsión armónica (THD).

En el momento en que se plantea la necesidad de disponer de un sistema anti-islanding es importante conocer las características del generador al que va asociado [3]. Los tres tipos de generadores principales que se pueden encontrar en los sistemas de generación distribuida son:

- *Síncronos*: Tienen capacidad para poder mantener una isla en caso de que se produzca. Debido a la potencia que pueden llegar a tener, hasta 30MW, las opciones que se pueden aplicar para detectar islanding son limitadas, ya que, en muchos casos, no hay un desarrollo de la electrónica de potencia acorde al tamaño de la fuente.
- *Asíncronos*: no es necesario que se considere la protección anti-islanding para este tipo de máquinas. Como necesitan la reactiva de la red para su funcionamiento, no pueden sostener por sí mismos una isla.
- *Basados en inversores*: es muy habitual encontrarlos en los sistemas de generación distribuida debido a su pequeño tamaño (hasta 1MW como máximo). El inversor actúa como interfaz entre la fuente y la red. La fuente puede ser un panel solar, una turbina eólica, hidráulica,

algún sistema de almacenamiento energético, etc. Todos estos generadores necesitan el desarrollo específico de sistemas anti-islanding en función de la propia topología del convertidor.

2.1 Clasificación. IDMs en generación distribuida

Los métodos IDMs son muchos y muy variados y es fácil encontrar en la literatura ejemplos de ellos y de posibles clasificaciones. El objeto de este Trabajo Fin de Máster no es el estudio detallado de IDMs, por lo que se dará en este apartado simplemente una visión general de la estructura jerárquica de esos métodos y se mencionarán algunos de los más importantes. Hay una primera clasificación en la que los autores coinciden y es en distinguir entre *métodos locales* y *métodos remotos*.

Los *métodos remotos* son los que actúan desde el nivel del operador del sistema, o lo que es lo mismo, desde el lado de la red principal.

Los *métodos locales* son aquellos cuyo ámbito de operación es la propia fuente de generación distribuida (GD). Se centran básicamente en la actuación de los inversores. Los inversores asociados a cada fuente pueden adquirir información de la misma y tomar la decisión de desconectarla.

Pero se puede profundizar un poco más en estos métodos. Dentro de los *remotos*, se pueden encontrar varias categorías:

- *Impedance Insertion (II)*: con este método, se inserta una pequeña impedancia, que suele ser un banco de condensadores en el lado de red cuando se abre el interruptor del sistema principal. Con esta medida, se produce un cambio en el valor de las tensiones y de la frecuencia como resultado del desequilibrio instantáneo entre

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

generación y carga. Estos cambios son detectados por el operador del sistema, que debe actuar.

- *Power Line Carrier Communications (PLLC)*: Este método se basa en un sistema de telecomunicación entre la red principal y la GD. La potencia que está transportando la línea en cada instante se utiliza como onda portadora. Desde una subestación de la red se emite una señal a cada una de las fuentes y se recibe de vuelta. En el momento en que se produce el islanding, la señal pierde el camino de retorno y se actúa desconectando la fuente.
- *Transfer Trip (TT)*: Para la aplicación de este método todos los interruptores de la microrred y de la red principal tienen que estar comunicados entre sí. Cuando se produce una desconexión, los algoritmos de control son capaces de señalar qué partes del sistema han dejado de ser observables. Puede utilizarse para ello la tecnología SCADA. Por eso, aunque en algunos textos se proponen los sistemas SCADA como un grupo independiente [4], considero acertada su inclusión dentro del grupo TT.

En cuanto a los *métodos locales*, hay, a su vez, dos subgrupos: los *activos* y los *pasivos*. Esta clasificación está menos definida en la literatura que la del nivel jerárquico anterior, porque si bien los subgrupos *activos* y *pasivos* son comunes y son los dos habituales, ciertos autores proponen algún grupo complementario [5] y [6].

Los *métodos activos* introducen una variable adicional, un cambio controlado o una realimentación positiva como prueba de control del fenómeno de islanding. Los métodos activos son mucho más eficientes y fiables que los pasivos, pero a cambio tienen un coste muy superior. La respuesta no es tan rápida ya que depende del tiempo que tarde el sistema

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

en reaccionar ante la perturbación introducida. El otro inconveniente de este tipo de métodos es que el control de la perturbación tiene que ser muy exhaustivo para evitar la desestabilización del sistema. Si en el sistema existen además varios inversores, pueden producirse interferencias indeseadas entre ellos.

A continuación se mencionan brevemente algunos de los métodos activos más conocidos, pero la cantidad de ellos es muy amplia.

- *Detection of Impedance at a Specific Frequency (DISF)*: Para la aplicación de este método se inyecta una corriente armónica a una determinada frecuencia que se traduce en una determinada tensión armónica. Si la corriente armónica deja de circular, el sistema está en situación de islanding.
- *Slip Mode Frequency Shift (SMS)*: Utiliza la realimentación positiva que desplaza la fase y, por tanto, la frecuencia en el PCC para indicar el fenómeno de islanding.
- *Frequency Bias (Active Frequency Drift) (AFD)*: En este método se inyecta una corriente que está ligeramente distorsionada y que intenta variar el valor de la frecuencia. Cuando el inversor se encuentra conectado a la red, la frecuencia viene impuesta. Si el sistema entra en "islanding", la frecuencia sube o baja, activando el relé de sobrefrecuencia o de subfrecuencia.
- *Sandia Voltage Shift (SFS)*: Se apoya en la utilización de la realimentación positiva, como el SMS. Ante una situación de islanding, lo que se detecta es una variación en la tensión del PCC.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Los métodos pasivos son aquellos que se basan en los cambios importantes en ciertas magnitudes que se producen en una situación de islanding. Para ello, se monitorizan y se toman medidas de tensión, corriente, frecuencia o potencia, THD, etc. A partir de esas medidas, se fijan los umbrales de actuación de las protecciones. El mayor inconveniente de estos métodos es que presentan zonas de no detección (NDZ) relativamente grandes cuando la potencia que se genera en la microrred es exactamente igual a la que se consume en las cargas. Sobre este punto se profundizará más adelante.

En los métodos pasivos se pueden establecer cuatro grupos principales según la medida registrada: frecuencia, tensión, potencia o distorsión armónica.

Los IDMs más comunes entre los pasivos son los asociados a la medida de frecuencia en el caso de que los generadores sean síncronos, ya que es bien sabido que cuando se produce una diferencia apreciable entre generación y carga hay una variación brusca de la frecuencia en el sistema. Algunos de los IDMs más habituales que involucran la frecuencia son:

- *Under-Over Voltage (UOF)*: la orden de disparo se da tanto para condiciones de sobrefrecuencia como de subfrecuencia.
- *Rate of Change of Frequency (ROCOF)*: dispara cuando se produce una variación de la frecuencia, medida en Hz/s. Los ajustes típicos suelen estar entre 0.1Hz/s y 2Hz/s.
- *Rate of Change of Frequency Over Power (ROCOFOP)*: Cada vez que uno de los índices de detección supera un cierto valor, un contador asociado se incrementa en una unidad. Cuando el valor del contador supera el umbral fijado, se produce el disparo.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

En cuanto a tensión, el más habitual es el *Under-Over Voltage (UOV)*, que activa el relé cuando se produce una variación de la tensión en el PCC debida a un fenómeno de islanding. En cuanto a la potencia, uno de los métodos más conocidos es el *Rate of Change of Power (ROCOP)*, que actúa ante las descompensaciones de potencia. Cuando se trabaja en el campo de los armónicos, los IDMs más conocidos son el Voltage Harmonics (VH) y el Current Harmonic (CH), que indican el estado de islanding y activan las protecciones en función de las tasas de distorsión armónica detectadas en la tensión y en la corriente.

En la referencia [7] se puede encontrar una recopilación interesante de muchos de los métodos que se encuentran en la literatura ligada al campo de los IDMs. Si bien la explicación de los métodos no es extensa ni detallada, puede dar una imagen global bastante acertada.

A continuación, en la figura 1 se muestra un esquema de la clasificación de IDMs expuesta en este apartado.

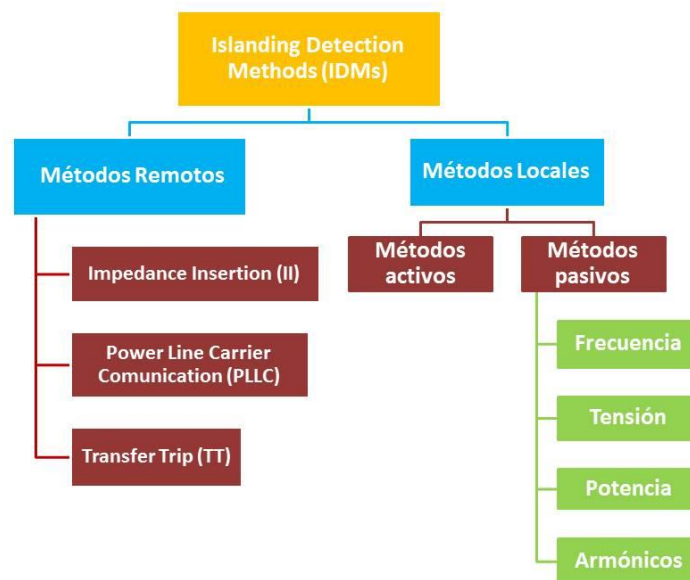


Fig. 1. Clasificación de IDMs

2.2 IDMs aplicados a microrredes

En el apartado 2.1 se ha expuesto una clasificación de los métodos más conocidos para la detección del fenómeno de islanding. Todos estos métodos están planteados para analizar la problemática ligada a la integración de generación distribuida en los sistemas eléctricos. Lo que es bien cierto, es que para la generación distribuida este campo de estudio ha avanzado mucho en la última década. Pero la idea de que los métodos de detección de islanding se planteen desde el punto de vista de un único inversor debe ser disociada cuando se quieren extender los procedimientos de detección al caso de las microrredes.

La extensión más lógica del caso de IDMs basados en un único inversor es el planteamiento para la situación en que existan varios inversores. Es una posibilidad relativamente estudiada y de la que es fácil encontrar ejemplos en la literatura [8,9,10]. Pero un caso que prácticamente no ha sido estudiado es el de la extensión de los IDMs a las microrredes. Lo que se muestra a continuación es la reestructuración de la jerarquía de los IDMs mostrada en el apartado anterior, y que se ha propuesto por primera vez por los investigadores de la Universidad de Wisconsin-Madison.

La primera división importante separaba a los métodos de detección de islanding en dos categorías: locales y remotos. En el caso de los locales se podía distinguir a su vez entre métodos pasivos y activos. Efectivamente, esa clasificación es adecuada cuando nos referimos a los métodos basados en un único inversor. Si las necesidades de estudio en el campo de la generación distribuida y las microrredes han cambiado, también es necesario

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

desagregar el concepto de "método local" en tres: inversor único, multi-inversor y microrred. El caso de microrred incluye múltiples inversores y además una serie de cargas críticas, el microinterruptor de conexión al PCC y otra serie de fuentes de generación distribuida como puedan ser los generadores síncronos.

En la figura 2 se muestra la nueva estructura jerárquica.

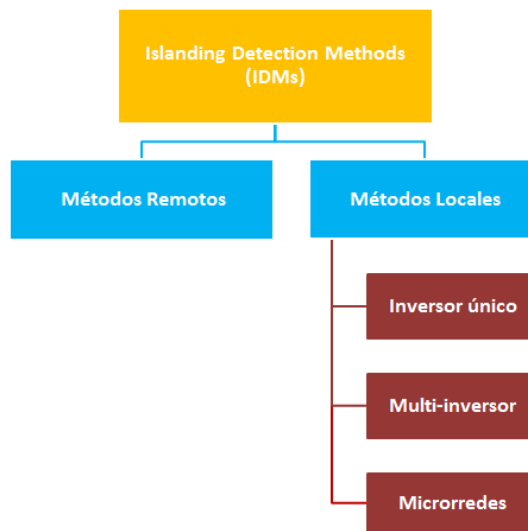


Fig. 2. Nueva estructura jerárquica de los IDMs

El caso de multi-inversor es una extensión del caso de inversor único, pero no todos los métodos descritos en el apartado anterior son extrapolables. En la literatura se muestran algunos ejemplos de ciertos métodos que sí pueden extenderse. Por ejemplo, en [11] se estudia el método AFD y en [12] se aplica el SMS. Hay alguna referencia más, aunque no demasiadas que aborden la temática del inversor múltiple. En [13] se propone un nuevo método basado en la inyección de corriente de secuencia

negativa en el PCC. Del resto de métodos mencionados en el apartado anterior, no se han encontrado referencias explícitas en la literatura técnica.

En cuanto al desarrollo de los métodos de análisis específicos para microrredes el caso es mucho más complejo al no encontrarse casi referencias que aborden la situación actual de los IDMs para este tipo de sistemas [7]. Dos referencias se muestran aquí [14,15]. En ellas se trata de dar una idea del grado de desarrollo en que se encuentran los métodos de detección de islanding para microrredes. En las tres se hace una distinción importante: en el caso de las microrredes hay que diferenciar entre lo que es un método anti-islanding y lo que es un método de detección de islanding. El primer término proviene de la industria solar fotovoltaica. Cuando se habla de anti-islanding y bajo esta metodología se obliga a que el inversor deje de alimentar el área local en un determinado tiempo cuando se produce un fenómeno de islanding. En las microfuentes basadas en inversor el comportamiento debe ser distinto en una microrred ya que no se quiere que el inversor deje de alimentar a la microrred sino que el área entera, en conjunto, deje de alimentar las cargas. Y además si en la microrred se exigiese la desconexión de cada una de las fuentes se estaría actuando en contra de la propia filosofía que subyace a las microrredes. En las tres referencias se mencionan estas diferencias, pero los métodos que se analizan están implementados en cada uno de los inversores. Es cierto que se menciona que esos inversores no deben desconectarse de la red cuando ocurre una situación de islanding y que si además, el método de detección es activo, debe inhibirse cuando la microrred ha quedado aislada. Se puede

concluir que no hay literatura que trate de forma adecuada a la microrred como conjunto y que establezca que la responsabilidad de la detección del islanding pertenece al microinterruptor y bajo esa perspectiva, enfoque y defina los métodos de islanding.

2.3 Ensayo de verificación del estándar 1547 y su extensión al caso de microrredes

El estándar 1547.1 proporciona un procedimiento para comprobar que el componente de interconexión de la microrred a la red principal (microinterruptor) deja de energizar cuando se produce una situación de islanding no prevista.

El circuito de prueba a utilizar es el que se muestra en la Fig.3

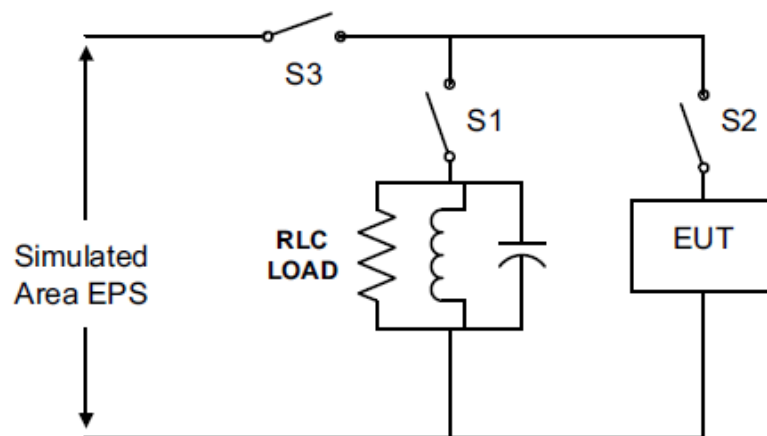


Fig. 3. Circuito de ensayo en el IEEE 1547.1 [2]

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

En donde EUT representa al equipo que se quiere probar (Equipment Under Test). El circuito, tal como se muestra, tiene que ser colocado entre cada fase y el neutro.

En (1) se exponen las ecuaciones que son necesarias para el cálculo de los parámetros RLC.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad L = \frac{V^2}{2\pi f \cdot P \cdot Q_f} \quad C = \frac{P \cdot Q_f}{2\pi f \cdot V^2} \quad (1)$$

Donde

R= resistencia de carga (Ω)

C= capacidad de la carga (F)

L= inductancia de carga (H)

Q_f = factor de calidad de la carga resonante

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

P = potencia real de salida por fase

Este circuito es utilizado para el cálculo del tiempo de actuación del método de detección de islanding de la generación distribuida. Una vez que se ha obtenido ese tiempo, se compara con el requerido según el estándar 1547 para asegurar la validez del método.

Para llevar a cabo la prueba se cierran los tres interruptores marcados en la Fig... como S1, S2 y S3 y se ajusta el valor de la carga RLC de manera que la corriente de frecuencia fundamental que circule por esa rama sea menor que el 2% de la asignada para el EUT. A continuación se abre S3, de manera que se simula una falta en la red o una perturbación y se mide el

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

tiempo que tarda el interruptor S2 en abrir. Este circuito es el estándar para cualquier método de detección de islanding.

Los IDMs planteados inicialmente estaban pensados para que el inversor actuase como detector y actuara ante una situación de islanding. La ampliación de los métodos de detección al caso de microrredes exigen una serie de modificaciones para que sean compatibles con la electrónica de potencia que gobierna los microinterruptores. Los microinterruptores suelen tener tiristores, que se controlan desde una placa de control y la lógica que gobierna estos tiristores es muy distinta de la que gobierna un inversor. Los IDMs activos no son fácilmente extensibles desde los inversores a los microinterruptores, pero los métodos pasivos, al basarse en información que reciben de la propia microrred deben serlo.

A partir del circuito original definido en el IEEE 1547 se propone un nuevo circuito, en la figura 4, para comprobar el funcionamiento de los IDMs en microrredes.

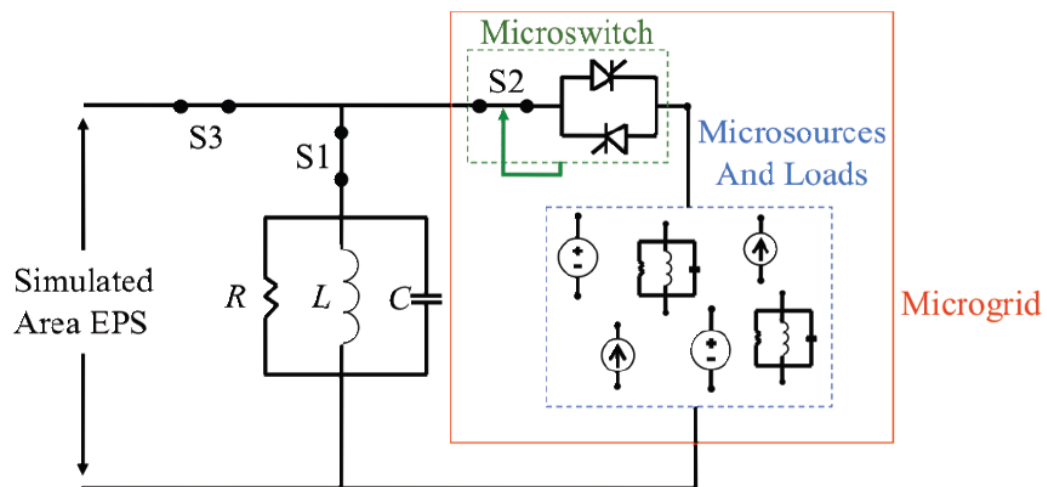


Fig. 4. Extensión del circuito del IEEE 1547 al caso de las microrredes [7]

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

En este circuito, en lugar de tener una única unidad para prueba (EUT), que habitualmente es una fuente de generación distribuida o un inversor, se tiene un conglomerado de fuentes, cargas, elementos de almacenamiento más un microinterruptor conectado en el punto de conexión común. Debido a las resistencias parásitas que forman parte del circuito del interruptor, para que la microrred esté completamente separada de la red principal, el microinterruptor tiene que tener el control del contactor S2. Antes de volver a conectar la microrred de nuevo y de sincronizar, S2 debe estar cerrado.

Una de las principales dificultades que tiene la extensión del circuito del IEEE 1547.1 a las microrredes estriba en la explicación de qué es la potencia P en microrredes. En 1547.1, P se define como la potencia real de salida por fase (W). Pero no está claro qué es P para el caso de una microrred, ya que una microrred puede comportarse de tres modos distintos con respecto al flujo de potencia:

1. Exporta

La potencia fluye desde la microrred hacia la red principal y el área de carga. A todos los efectos, desde el lado de la red principal la microrred se comporta como una única fuente de generación distribuida.

2. Importa

La potencia es inyectada desde la red hacia la microrred. En este caso, la microrred es globalmente una carga vista desde el lado de la red principal.

3. Istmo

Existe conexión física entre la las redes pero no hay flujo de potencia ni que llegue a la microrred ni que salga de ella. Este estado es una generalización del estado de "isla, en el que no hay flujo de potencia y además la microrred no está conectada en el PCC.

Para el caso 1, en que la microrred exporta energía, la situación queda claramente definida en el estándar 1547.1. Las dificultades se presentan en las otras dos situaciones, para las que no hay normativa al respecto, a pesar de haberse aprobado el procedimiento 1547.4.

1.4 Herramientas de análisis de los IDMs

Como parece razonable no todos los IDMs son iguales ni responden de la misma manera. Es necesario establecer unos procedimientos que permitan la comparación de los diferentes métodos de detección del islanding. Hay dos metodologías principales para el análisis de la efectividad de los IDMs. La primera de ellas se conoce como Power Mismatch Space Representation (PMSR) y la segunda se denomina Load Parameter Space Representation (LPSR). A continuación se define lo que es una zona de no detección (NDZ) para cada una de ellas:

- Para una carga fija dada, hay una cierta región del plano formado por ΔP y ΔQ en que el IDM no funciona. O lo que es lo mismo, en un espacio definido por los desajustes de potencia (Power Mismatch Space) hay un subespacio en que los métodos de detección del islanding no funcionan. Ese rango de valores de ΔP y ΔQ forman la zona de no detección \longrightarrow PMSR

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Para un valor fijo de ΔP (normalmente es cero) y asumiendo que la carga es de tipo RLC, hay ciertos valores de R, L y C para los que no se detecta el islanding. Es decir, en el espacio de carga (Load Space) definido por los valores R, L y C hay un subespacio en que los métodos de islanding no funcionan. Ese subespacio es la zona de no detección para el IDM analizado → LPSR

En la figura 5 se expone la clasificación jerárquica de los métodos nombrados.

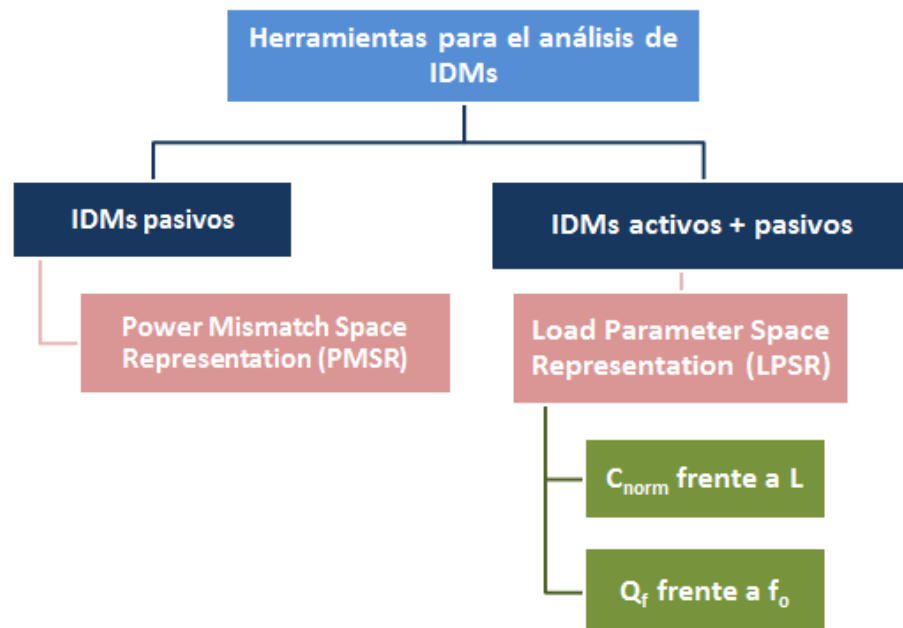


Fig. 5. Clasificación jerárquica de las herramientas para análisis de IDMs

PMSR utiliza la cantidad de potencia activa y reactiva que fluye desde la red hasta el PCC (ΔP y ΔQ en la figura 6).

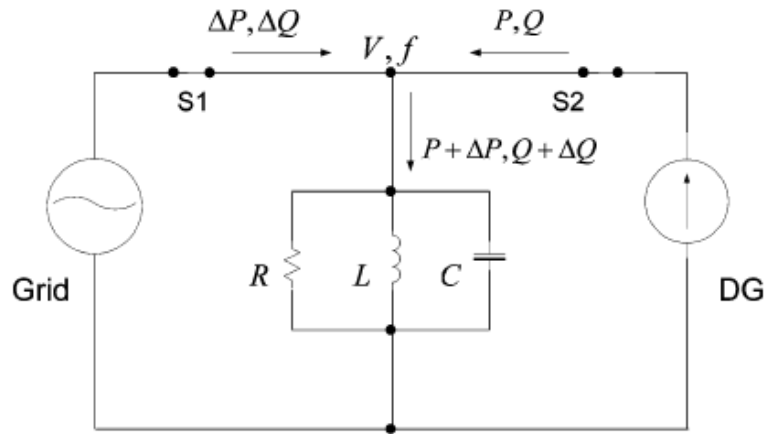


Fig. 6. Circuito utilizado para el PMSR []

Cuando ocurre una situación de islanding, se abre el interruptor S1 y tanto ΔP como ΔQ toman el valor cero. El sistema alcanza un nuevo punto de equilibrio entre generación y carga. En este método, las zonas de no detección son representaciones gráficas en el espacio $\Delta P - \Delta Q$. El valor de ΔP y ΔQ es de gran importancia, porque su modificación produce cambios en los niveles de tensión y en la frecuencia del PCC, y esas variaciones serán los indicadores válidos a utilizar por los métodos de detección pasivos.

Como ejemplo de la aplicación del método se muestra aquí un caso recogido en la literatura [16]. En la figura 7 se representa un estudio de NDZs para los métodos pasivos más habituales, que son los de sobre y subfrecuencia (OF-UV) y sobre y subtensión (OV-UV) y para dos factores de calidad diferentes de la carga resonante Q_f .

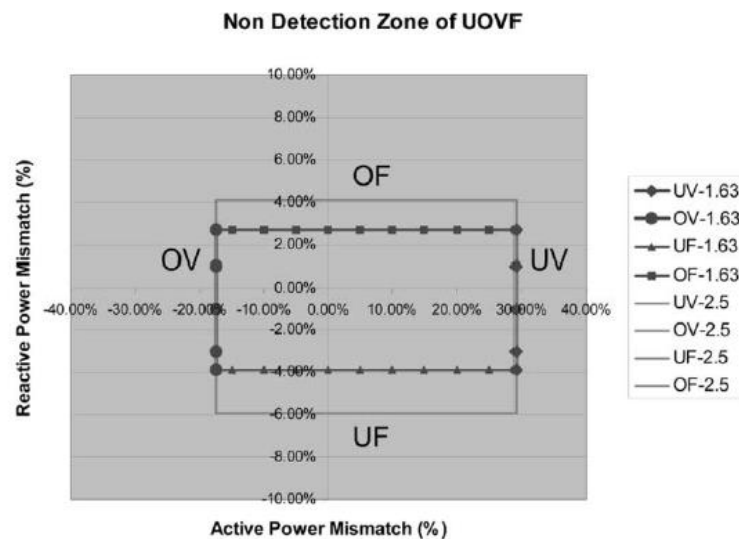


Fig. 7. Zonas de no detección para algunos IDMs pasivos

Como parece razonable, cuanto menor es el área correspondiente a la NDZ, más exacto es el método de detección. El PMSR tiene una utilidad limitada. Sólo es válido para el estudio y el análisis de métodos de tipo pasivo, ya que como basan su funcionamiento en magnitudes y no tecnologías concretas, pueden ser comparados utilizando índices comunes.

A la hora de estudiar los métodos activos se hace necesaria una herramienta mucho más avanzada que el PMSR. Esa herramienta es el LPSR. Se basa en un criterio que establece que la suma del ángulo de fase de la carga y el ángulo de fase a la salida del interruptor de la microrred debe ser cero. Para cada punto del espacio del parámetro de carga (load parameter space) la frecuencia en régimen permanente de la microrred puede ser calculada en base a una criterio de ángulo que es específico y propio de cada método activo que se quiere analizar. El método LPSR es mucho más completo en dos aspectos: el primero de ellos es que es más sencillo analizar cómo variará la efectividad del método si se modifica el factor de calidad de la carga. El segundo es que, con el LPSR se pueden

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

estudiar tanto métodos activos como pasivos y además de manera conjunta, representándolos en un único espacio dependiente de la frecuencia.

Dentro de esta segunda metodología existen dos posibles derivaciones.

- C_{norm} frente a L (Capacitancia normalizada frente a inductancia)

El ángulo a la salida de la microrred se controla de manera que cuando se produce el fenómeno de islanding, el ángulo de la carga sea cero. Uno de los problemas que presenta esta representación es que necesario plasmar un NDZ diferente para cada condición de carga y consecuentemente, es difícil identificar la influencia real que tiene el factor de calidad de la carga en la detección del islanding.

- Q_f frente a f_o (Factor de calidad frente a la frecuencia de resonancia)

La principal ventaja que presenta esta representación frente a la otra es que sólo es necesario un gráfico de la NDZ para poder analizar la validez del IDM con cualquier combinación de carga.

3. MICRORRED UW

3.1 Principios de operación de la microrred CERTS – UW

Este Trabajo Fin de Máster ha sido desarrollado utilizando como sistema de prueba la microrred instalada en el laboratorio de Electricidad de la Universidad de Wisconsin-Madison (UW). Esta microrred actúa según unos principios que fueron planteados de forma conjunta por el Consortium for Electric Reliability Technology Solution (CERTS) y los investigadores adscritos a dicha Universidad estadounidense. Aparecieron por primera vez referidos en el año 1998.

La microrred CERTS-UW está pensada para que, a todos los efectos, desde el lado de la red principal el conjunto actúe como un único generador equivalente totalmente controlado y que se encuentra conectado en el Punto de Conexión Común (PCC). La microrred, debe comportarse de tal manera que no dañe en ningún caso ni ponga en peligro a los equipos conectados a ella y debe además cumplir con los códigos exigidos.

El concepto de microrred CERTS – UW pretende dar respuesta a los retos tecnológicos derivados del uso de estos sistemas. Sus dos principios de funcionamiento básicos son:

- Peer to peer
- Plug and play

Según el primer principio, Peer to Peer, ninguno de los componentes de la microrred debe ser crítico. Esto significa que ante la falta de cualquier grupo de generación o carga, el sistema es capaz de seguir funcionando con normalidad. Este primer principio también lleva implícito que cada uno de los

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

grupos de generación tiene que tener controles independientes potencia-frecuencia y sus propias protecciones.

El principio Plug and Play asegura la intercambiabilidad de dos unidades de la red sin que haya necesidad alguna de reajustar, redefinir o rediseñar los controles asociados.

La mayoría de la filosofía que subyace a la gestión de las microrredes se encuentra englobada bajo los dos principios anteriores. Sin embargo, con el avance de la investigación en este campo en los últimos años, se ha comprobado que estos dos principios, inicialmente expuestos, dejan sin definir las exigencias de respuesta para la microrred ante un fenómeno de islanding.

Para ello, los dos principios deben completarse con un tercero, que aparece descrito por primera vez en [7].

Este tercer principio ha sido llamado Islanding Responsibility y controla las acciones relacionadas con la interconexión entre la microrred y la red principal. Tareas que antes quedaban sin definir, como el control del estado de islanding o la sincronización pueden englobarse dentro de este tercer principio. Islanding Responsibility controla la actuación del microinterruptor de conexión, de tal manera que éste es el encargado de detectar el estado de la microrred y, si se encuentra en "islanding", desconectarla de la red principal en el tiempo que se haya establecido y siempre inferior al fijado por la normativa IEEE 1547. Si el interruptor detecta islanding, debe actuar de la forma expuesta, pero todas las microfuentes tienen que permanecer conectadas. Los interruptores asociados a cada microfuente deben estar ajustados como protecciones de respaldo, de tal manera que actúen si ocurre un fallo en el microinterruptor y por algún motivo, éste no abriera en el tiempo establecido.

En la figura 8 se muestra un esquema general de los principios descritos para la gestión de la microrred CERTS – UW



Fig. 8. Principios de operación de la microrred CERTS – UW

3.2 Descripción de la microrred

Una aplicación de los conceptos sobre la gestión de microrredes expuestos en el apartado anterior se encuentra implementada en la microrred instalada en el laboratorio de la UW-Madison. La microrred incluye tres fuentes, un conjunto de cargas trifásicas, un sistema de almacenamiento basado en baterías y un interruptor estático (microinterruptor) de conexión a la red. Sirve como un gran laboratorio de experimentación de microrredes en la que se trabaja actualmente en algunos de los puntos clave de estudio de estos sistemas, tales como el control de microfuentes, la implantación de un sistema de comunicaciones wireless que permita obtener información en tiempo real, el diseño e implantación de un microinterruptor inteligente que

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

cumpla con los requisitos del IEEE 1547 o la conexión de vehículos eléctricos a microrredes, entre otros. Este trabajo se centra en la línea de investigación ligada al diseño del microinterruptor y a la implementación en él de métodos de islanding que sirvan para el cumplimiento de la normativa IEEE 1547.

La tensión de entrada a la microrred que proviene de la red principal es de 480V, mientras que la tensión interna y de las cargas es de 208V. Las microfuentes generan a 480V y mediante sus respectivos transformadores (45 kVA) ajustan el nivel de tensión a los 208V deseados. Las cargas pasivas de la instalación son puramente resistivas, regulables hasta 9 kW y están conectadas en estrella.

La primera fuente de generación es un grupo diésel de 12.5 kW de potencia. Es totalmente controlado por lo que tiene gobierno sobre la excitación y un regulador de velocidad. La segunda fuente lleva un inversor de 15 kW de potencia. La tensión del bus DC se obtiene a partir de una pareja gemela de fuentes de corriente continua conectadas en serie. Esta fuente puede emular el comportamiento de cualquier tecnología de generación renovable, ya que casi todas se conectan a la red por medio de un convertidor electrónico. A la salida de cada inversor se encuentra una inductancia en serie con un transformador. Esta inductancia actúa como elemento de filtrado para la corriente generada. Los transformadores están conectados en estrella en el lado de la fuente y en triángulo en el lado del inversor. El neutro de la estrella de esos transformadores está conectado, a su vez, al neutro del cable de la instalación.

La tercera fuente está formada por un conjunto de baterías con un convertidor reversible, de 15 kW, que es exactamente igual al de la otra fuente. La diferencia entre ambas estriba en la forma de obtener la tensión del bus de continua, ya que, en este caso, en vez de ser a través de fuentes

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

DC en serie, es a partir de un conjunto de baterías. Estas baterías tienen una potencia en descarga de 15 kW, de 2.5 kW en carga y una capacidad de 7.5 kWh.

La figura 9 muestra un esquema de la instalación:

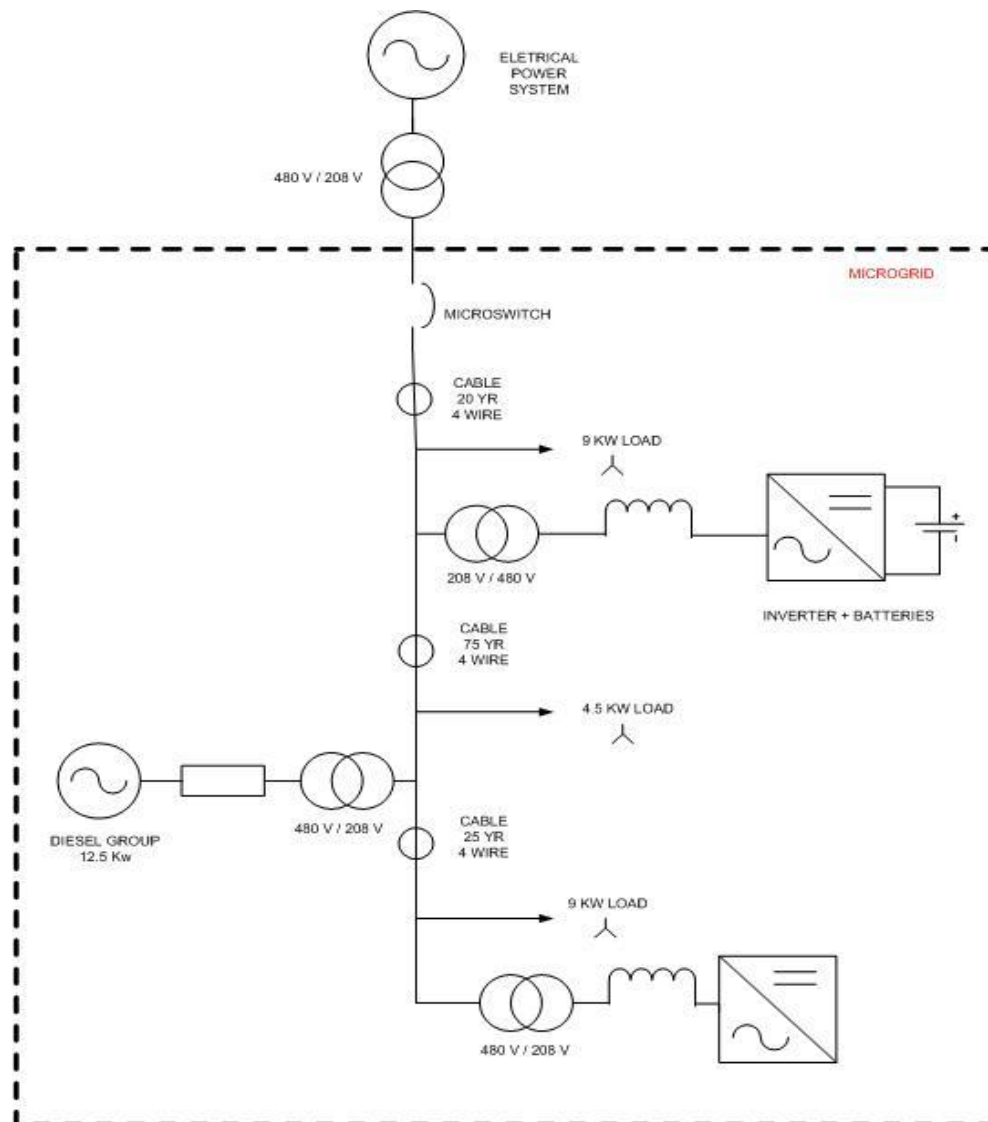


Fig. 9. Esquema de la configuración global de la microrred

3.3 El microinterruptor

El microinterruptor, tiene como función principal la detección y desconexión de la microrred ante una situación de islanding.

Hay dos razones principales por la que se ha optado por un interruptor estático para esta microrred. La primera de ellas es que no tiene partes mecánicas, por lo que se asegura una vida en operación mucho más larga que si fuese un interruptor convencional. La segunda de ellas es que, este interruptor no necesita sólo desconectar, sino que además debe comprobar las condiciones de sincronización y volver a reconectar cuando sea posible sin provocar transitorios inaceptables. Mediante los contactores de tipo estático se evitan las sobretensiones ligadas a los "rebotes" de los elementos mecánicos.

El interruptor debe desconectar si se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Que calidad de la onda de tensión no sea suficiente, es decir, que haya desequilibrios de tensión o cargas asimétricas.
- Que la frecuencia en el lado de red caiga por debajo de un umbral fijado, lo que indicaría que la red se ha perdido.
- Que haya huecos de tensión que duren un tiempo excesivo, por ejemplo porque las protecciones no actúen de forma adecuada.
- Que haya alguna falta en el sistema que provoque una sobrecorriente en el interruptor.
- Que se detecte alguna corriente no controlada que fluya de la microrred a la red principal.

3.3.1 Estructura

El microinterruptor de la microrred CERTS-UW se compone principalmente de dos elementos:

- El puente de tiristores y los controles que lo gobiernan
- El interruptor controlable para desconectar

En la figura 10 se observan las diferentes partes que componen el microinterruptor inicialmente diseñado.

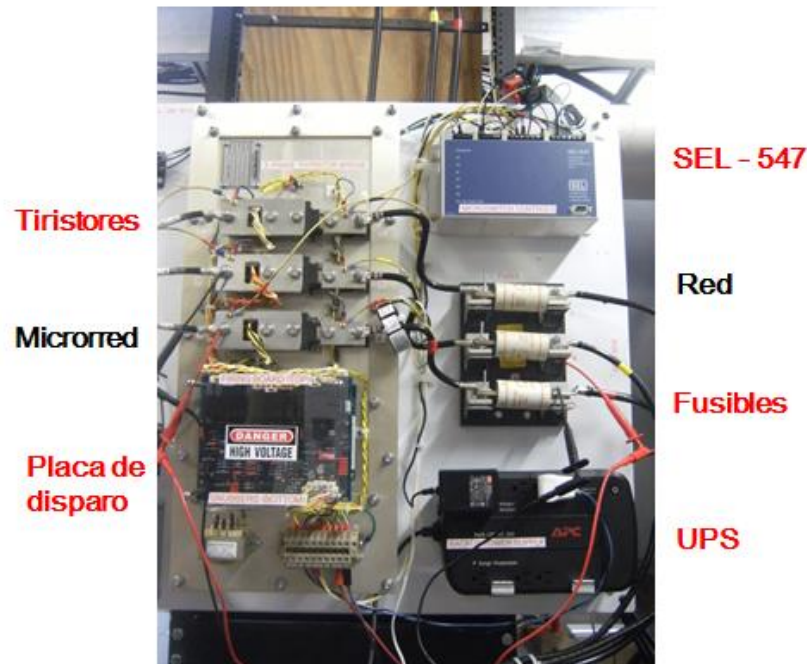


Fig. 10. Imagen del microinterruptor instalado en el laboratorio de la Universidad de Wisconsin - Madison

El interruptor de desconexión, que no aparece reflejado en la figura 10 por encontrarse en la parte posterior del panel, es imprescindible ya que, debido a los snubbers que existen en los elementos de electrónica de

potencia para la amortiguación de los transitorios de tensión, si no existiese este interruptor no habría desconexión real de las dos redes. O lo que es lo mismo: habría siempre un camino para la circulación de corriente incluso cuando los tiristores no están disparados.

3.3.2 Controles del microinterruptor. El relé SEL-547

El puente de tiristores se gobierna desde la placa de disparo, en función de si ésta recibe una señal ON/OFF del control del microinterruptor, que en este caso es un relé SEL-547. El relé también se activa según una señal externa, controlada por el operador del sistema. Si el operador decide activar la señal de sincronización (una señal de 24V de continua), el relé sincronizará en el "momento adecuado", es decir, cuando la diferencia de los valores de los módulos de los fasores de tensión entre ambas redes sea mínima y la diferencia de frecuencias también lo sea. El microinterruptor toma información tanto del lado de la microrred como del lado de la red principal. Se miden todas las tensiones fase-neutro en el lado de la red. En el lado de la microrred sólo se mide la tensión de la fase A (V_s) para sincronizar y sólo se mide igualmente la corriente en esa fase,

Sobre el interruptor recaen las dos funciones principales de sincronización y de detección de las condiciones de islanding y desconexión. Los controles del interruptor deben asegurar que el interruptor cumple con el principio exigido de "islanding responsibility". La lógica que gobierna el control del microinterruptor aparece reflejada en el diagrama de bloques de la figura 11.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

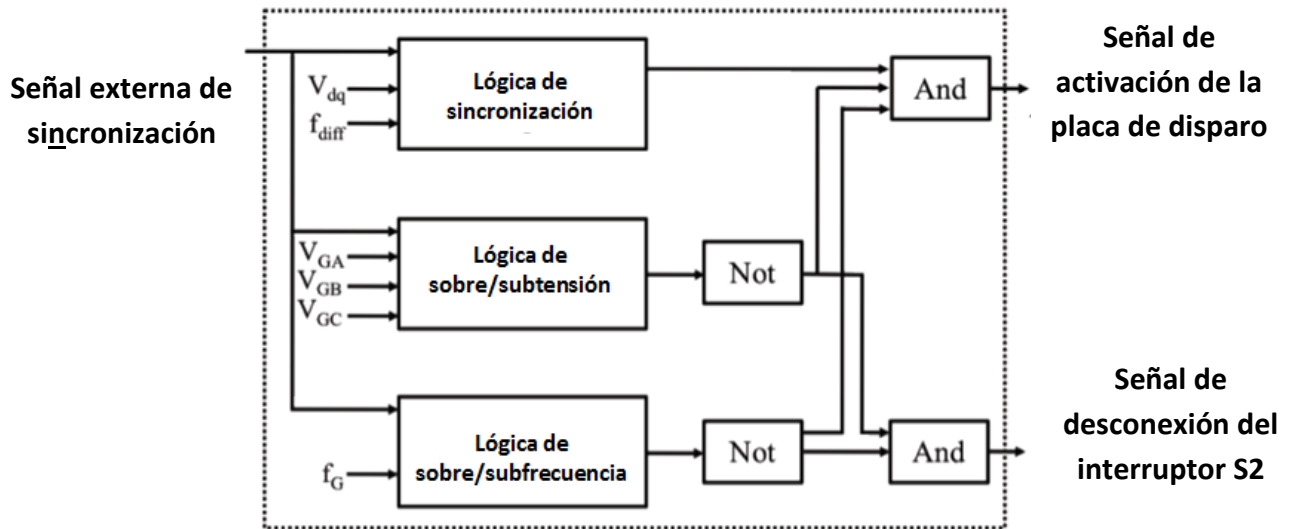


Fig. 11. Lógica de bloques del microinterruptor incluyendo la lógica de sincronización y la de sobre/subtensión y sobre/subfrecuencia.

La señal externa de sincronización da luz verde para que los controles se activen. Para sincronizar se utilizan dos magnitudes. La primera de ellas es la tensión en ejes dq que proviene de la medida de tensión en la fase A del puente de tiristores. Y la segunda es f_{diff} , que es la diferencia de frecuencias entre la microrred y la red principal. Actualmente, el sistema de detección de islanding se confía a la funcionalidad del relé SEL-547, que tiene implementados los métodos pasivos de sobre y subfrecuencia y de sobre y subtensión. Para los métodos de sobre y subtensión se utilizan las medidas de las tres tensiones fase-tierra medidas en el lado de la red (V_{ABC} en la figura 11) y para el de sobre y subfrecuencia se utiliza la medida de frecuencia de la red principal. Esas medidas entran en unos bloques que comparan sus valores con los de unos ciertos umbrales y deciden la actuación de la placa de disparo o la apertura del interruptor.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Se ha presentado la idea global del funcionamiento del microinterruptor. En la figura 12 se muestran detalles adicionales de la lógica de sincronización del relé.

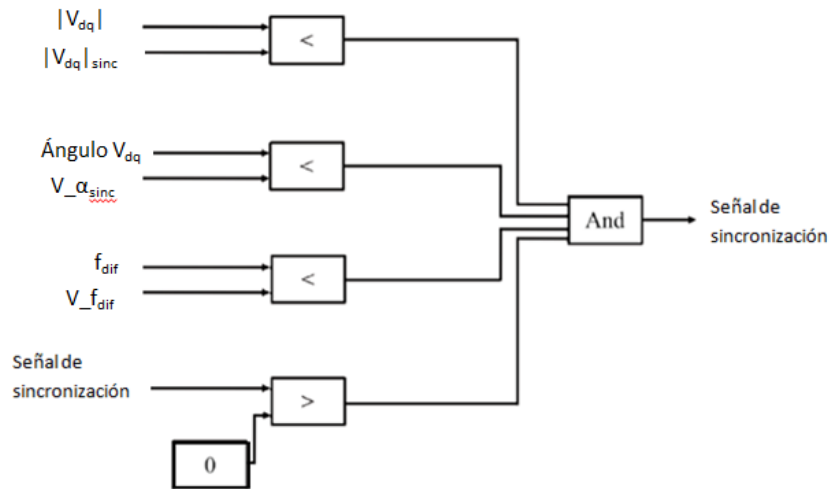


Fig. 12. Detalle de la lógica de sincronización implementada en el microinterruptor

Para la segunda gran responsabilidad del microinterruptor, que es la de la detección del fenómeno de islanding. El relé SEL-547 tiene programados internamente los controles para actuar cuando se producen situaciones anormales. Estos controles están asociados a la detección del fenómeno de islanding mediante los métodos de sub/sobretensión (UOV) y sub/sobrefrecuencia (UOF). Son métodos pasivos, tal como se expuso en la clasificación del apartado....

En la figura 13 se muestra la lógica para los métodos UOV.

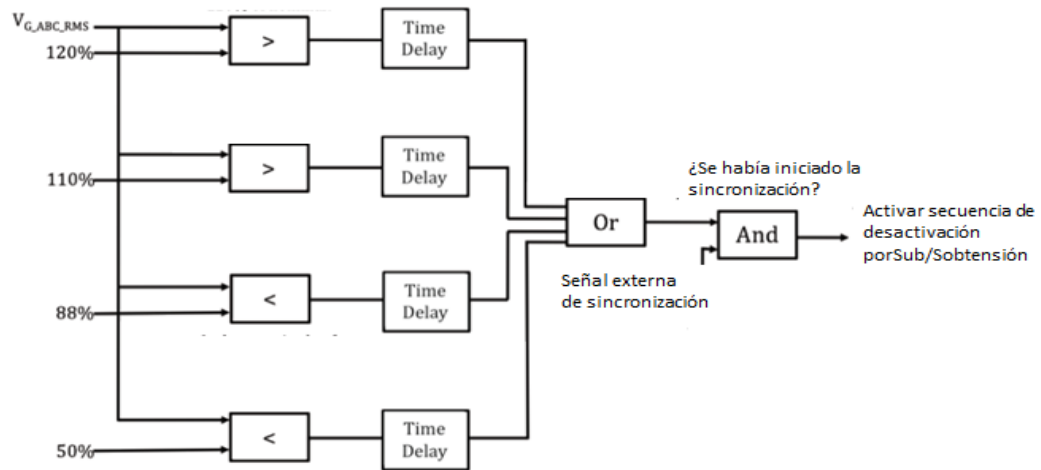


Fig. 13 Lógica de funcionamiento del relé SEL-547 para los métodos UOV

En el caso del UOV, el operador establece cuatro umbrales de tensión mínima o máxima como límites dentro de los cuáles se considera que la operación es correcta. Si estos umbrales se superan y transcurre además un cierto tiempo fijado se inicia la secuencia de desconexión de la microrred de la red principal. Estos límites se comparan con cada uno de los valores de tensión en cada fase en el PCC.

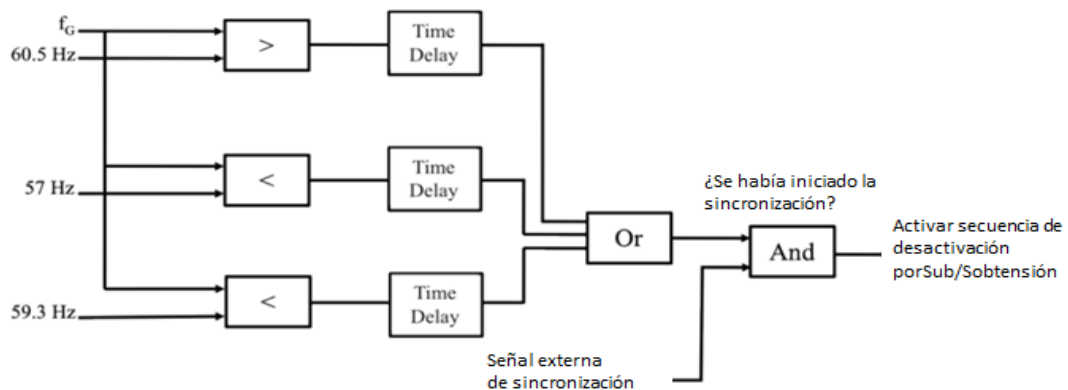


Fig. 14. Lógica del relé SEL-547 para los métodos UOF

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

La manera en que se han implementado estos métodos en el relé es muy similar. En este caso, son tres los umbrales fijados con los que se compara la medida de frecuencia del PCC. Cuando uno de los límites se sobrepasa y una vez que ha transcurrido un tiempo determinado, se activa la secuencia de desconexión.

Como ya se ha mencionado, los IDMs tienen zonas de no detección donde puede ocurrir que el método no se comporte adecuadamente. El punto de operación que puede considerarse clave a la hora de comprobar la efectividad del método es en el caso en que toda la energía suministrada a la carga provenga directamente de la microrred, aunque la red permanezca conectada (Figura 6). En este caso, la red principal que se mantiene en condición de "isla" sólo actúa para proveer de energía cinética al sistema y para actuar como sumidero de reactiva. Este punto es en el que los métodos presentan esa mayor dificultad de detección, porque al producirse la pérdida de la red principal, las fluctuaciones que se producen en el PCC pueden no ser suficientes para superar los umbrales establecidos en la protección. En los experimentos llevados a cabo a lo largo del tiempo en la microrred CERTS – UW se ha comprobado que, efectivamente, los métodos fallan en el punto especificado.

Resulta de interés mostrar a continuación las zonas de no detección del relé SEL-547 para los métodos de detección de islanding implementados en él, que son el de sobre y subtensión y sobre y subfrecuencia. A continuación se muestran los valores por defecto de los ajustes del relé para dos escalones de actuación distintos.

Tensión nominal (U_{nom})= 277.13 V (fase-neutro)

Frecuencia nominal (f_{nom}) = 60 Hz

Tensión máxima_1= $1.1 \cdot U_{nom}$

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Tensión máxima_2=1.2*Unom

Tensión mínima_1 = 0.88*Unom

Tensión mínima_2 = 0.5*Unom

Frecuencia máxima_1 = 60.5 Hz

Frecuencia máxima_2 = no está fijada. Debe ser menor que 69.9Hz. Para el ejemplo se supone 61Hz.

Frecuencia mínima_1 = 59.3 Hz

Frecuencia mínima_2 = 57 Hz

Factor de calidad = 2.5

Los límites que definen las zonas de no detección del relé fueron calculadas de acuerdo a las expresiones (3) y (4) [16] según la metodología Power Mismatch Space.

$$\left(\frac{U_{nom}}{U_{máx}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left(\frac{U_{nom}}{U_{mín}}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

$$Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{nom}}{f_{mín}}\right)^2\right) \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q_f \left(1 - \left(\frac{f_{nom}}{f_{máx}}\right)^2\right) \quad (4)$$

En la figura 15 se muestran los resultados en tanto por ciento del desajuste de potencia activa y del de potencia reactiva, tal como se explicaron en el apartado 1.4. En línea verde se representa la NDZ para el primer escalón de actuación y en rojo, para el segundo. Como es de esperar y para un mismo factor de calidad de la carga resonante, cuanto menores son los límites permitidos para las protecciones, menor es la zona de incertidumbre en su actuación.

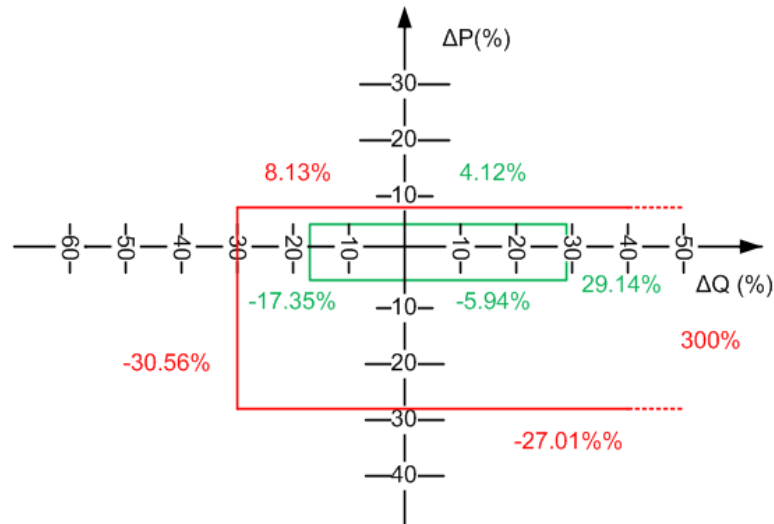


Fig. 15. Zonas de no detección para el relé SEL – 547 según los ajustes por defecto

Como resultado de ello se observa la necesidad de estudiar en profundidad el microinterruptor, a fin de poder definir nuevos métodos que solventen el problema de la NDZ en el punto de operación en istmo.

3.3.3 El relé SEL-734P

El relé 734P es un dispositivo de medida y monitorización de energía para análisis de la calidad de servicio eléctrico. Aunque los controles principales del microinterruptor recaerán en el relé 547, la actuación conjunta de los dos relés será necesaria para el correcto funcionamiento del método de detección de islanding.

El relé puede medir la demanda de energía o el factor de potencia de la instalación. Así mismo, tiene las funciones de medida, monitorización y

disparo por oscilaciones de tensión o de potencia, huecos de tensión o armónicos.

En el caso de interés para este trabajo, es de utilidad especial la medida de armónicos con una precisión muy alta, de hasta tres decimales. El estudio de armónicos en el PCC que se detallará en el capítulo 4 en esta memoria, determinará qué armónicos y en qué niveles de actuación deben fijarse en el SEL-734P. La detección por parte del relé SEL-743P de un nivel de armónicos superior al umbral fijado activará una señal de disparo que será enviada al relé de control principal SEL-547 que, a su vez, sacará de sincronismo al sistema mediante la inhibición de los pulsos que activan los tiristores.

3.4. LAS PLACAS DE DISPARO

3.4.1 FCOG61HV

Como paso previo a la propuesta y al estudio de nuevos métodos de islanding implementados en el microinterruptor es necesario comprobar que la topología física del dispositivo diseñado con anterioridad es adecuada. La placa de disparo FCOG61HV de ENERPRO es la que se pensó en un primer momento como elemento constituyente del microinterruptor y es la que aparece instalada en el mismo en la Fig. 10 . Es una placa muy compleja con control del ángulo de disparo de los tiristores y que utiliza la tecnología LSI. En este trabajo Fin de Máster se estudia el comportamiento de esta placa y el análisis de su idoneidad para la aplicación propuesta.

La elección de esta placa se debió a planteamientos previos al desarrollo de este estudio. Análisis anteriores sobre la posibilidad de nuevos IDMs en el microinterruptor indagaban sobre la posibilidad de detectar el

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

islanding activamente introduciendo armónicos adicionales en el PCC por medio de la variación del ángulo de disparo de la placa de tiristores. Si bien se demostró la inviabilidad de este método por medio de la simulación ya que el cambio en el ángulo no variaba de forma significativa la tensión armónica en el PCC [7] sí que se observó que la placa disponía de un elemento peculiar llamado Phase Loss Sensing que, por su propia constitución, podía servir como elemento que actuase para inhibir los pulsos de disparo de la placa de tiristores y así desconectar la microrred ante una situación de islanding inintencionado.

El Phase Loss Sensing es un circuito que suma y filtra las referencias de tensión a la entrada de la placa. En funcionamiento normal, la superposición de estas tres señales da como resultado una señal triangular de frecuencia triple con respecto a la fundamental de 60Hz, tal como se observa en la figura 16.

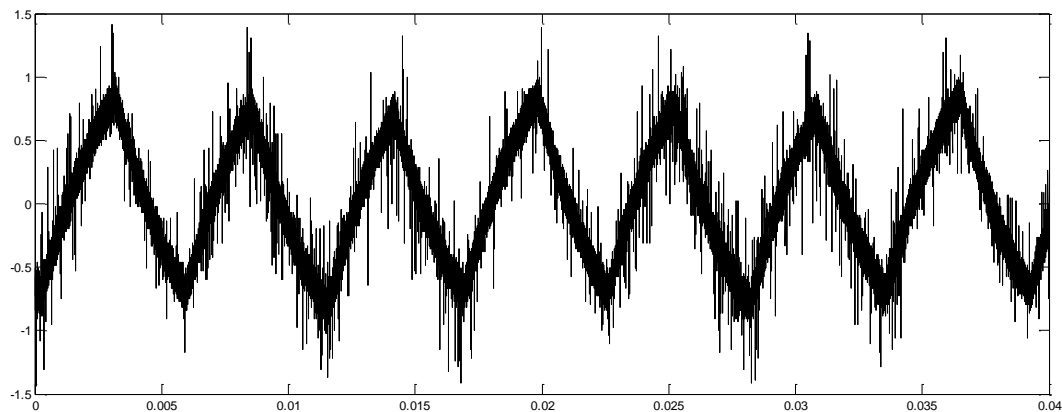


Fig. 16. Señal triangular a la salida del componente Phase Loss Sensing

Cuando el nivel de tensión en una de las fases es anormalmente bajo, la señal cuadrada de salida de los comparadores se desvía de su valor nominal. Como resultado, la suma de las tensiones excede la banda de funcionamiento que acota la señal triangular. Si se supera superior o

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

inferiormente uno de los umbrales fijados, se activa la señal que inhibe los pulsos de disparo de los tiristores.

A pesar de que en principio el estudio en profundidad de la placa de disparo es independiente del objetivo global de este estudio, se consideró adecuado estudiar el comportamiento y la validez de la placa de disparo FCOGHV61 como elemento constituyente del microinterruptor y, así verificar si el componente Phase Loss Sensing podría servir, por sí mismo, como elemento detector de islanding.

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio se calculó y construyó la carga RLC según lo especificado en el estándar 1547 y tal como se comentará en el capítulo 4. Con la inserción de la carga en el punto de conexión común se llevó a cabo la prueba de validación de IDMs según el circuito de ensayo tal como se recoge en la normativa y los resultados observados en el osciloscopio se muestran en la figura 17

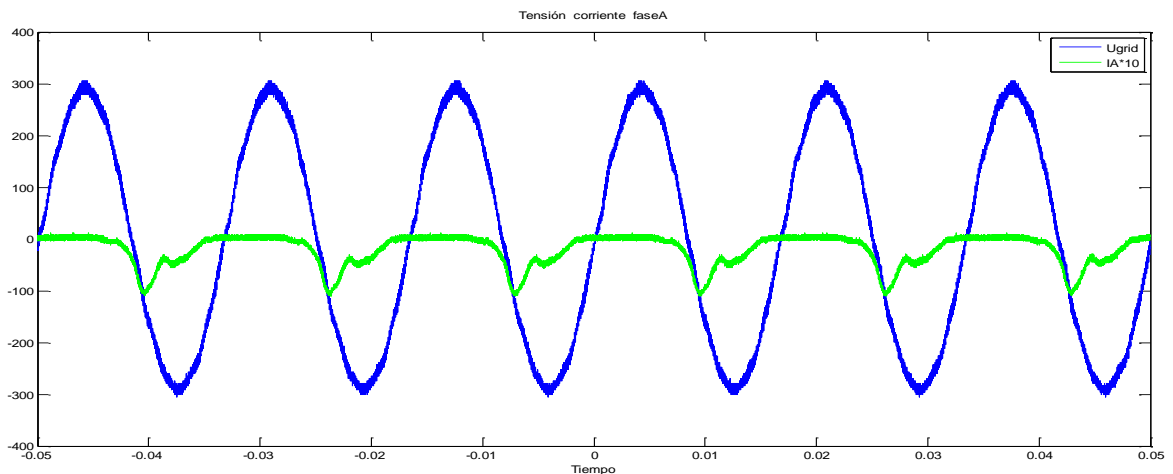


Fig. 17. Tensión y corriente en la fase A

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Como se puede observar en este caso, la forma de onda de la corriente aparece muy distorsionada y con picos negativos. Si observamos la potencia que fluye desde la red hacia la microrred y hacia la carga en la figura 18 se aprecian igualmente unas fluctuaciones inaceptables en la potencia.

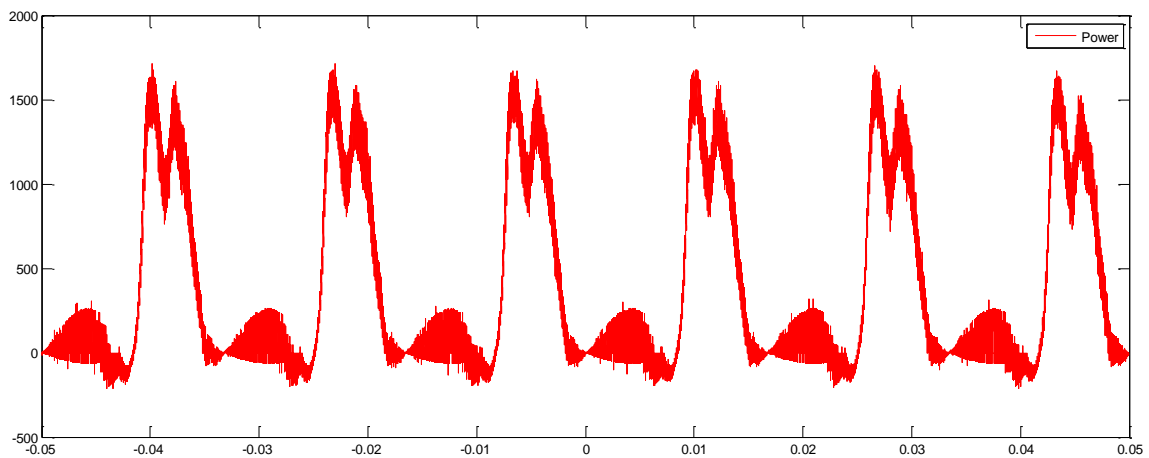


Fig. 18. Potencia en la fase A

Cuando la potencia fluye en sentido contrario, aparecen también fluctuaciones y son aún más severas. Queda claro que el conjunto, como tal, funciona de forma inadecuada. A fin de comprobar que el problema no depende de la carga RLC calculada e insertada en el PCC, se repiten las experiencias sin la conexión de dicha carga, aunque unos picos tan pronunciados hacen presagiar unos disparos inadecuados de los tiristores.

Si se desconecta la carga RLC y se toman medidas de la tensión, la corriente y la salida de los disparos de los tiristores una vez que pasan por los transformadores de pulsos de la placa (PM1, PM2 y PM3) se observa lo que aparece en la figura 19:

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

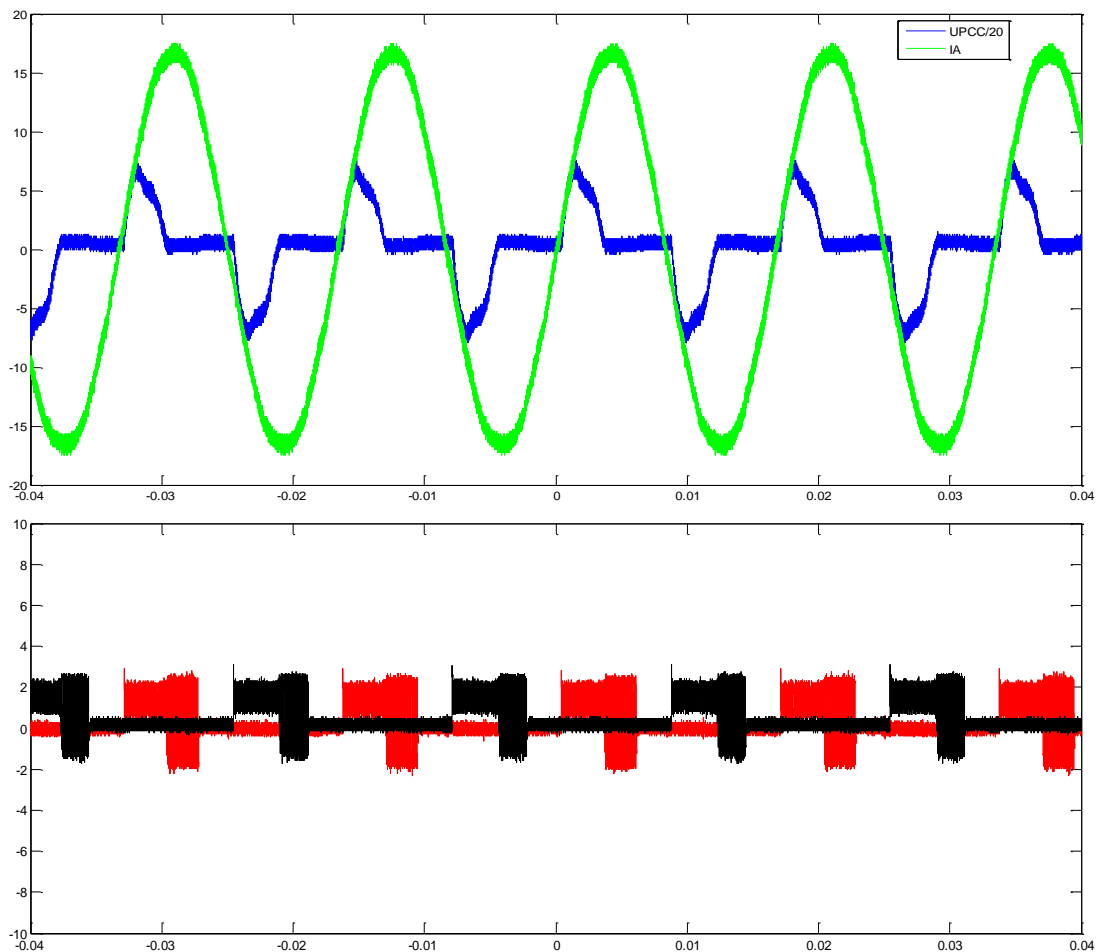


Fig.19. Tensión y corriente en la fase A y pulsos de disparo de una pareja de tiristores.

Prestando atención a estas gráficas el análisis es evidente. A pesar de que se ha programado en la placa de disparo el ángulo de retardo mínimo que permite el dispositivo ($10^\circ = 5V$) para que el tiristor conduzca el mayor tiempo posible, no se ha pensado en que la instalación tiene un factor de potencia que dista mucho de los factores de potencia de los convertidores comerciales, para los que está diseñada. En el caso correspondiente a la figura 19 se ha medido un factor de potencia en el PCC de 0.42. Esto

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

significa que el retardo de la corriente con respecto a la tensión hace que el tiristor se apague de forma natural cuando la corriente pasa por cero, lo que ocurre antes de que el pulso de disparo procedente de la placa se extinga.

Si se invierte el sentido del flujo de potencia y la energía se inyecta desde la microrred hacia la red principal, la tensión y la corriente se encuentran prácticamente en contrafase y las oscilaciones son aún más severas. Es decir, de forma más o menos pronunciada según el sentido de la potencia los disparos de la placa "cortan" la forma de onda de la corriente impidiendo la transmisión efectiva de energía entre ambas redes y provocando fluctuaciones de potencia y sobrecorrientes del todo inadmisibles.

La conclusión final del análisis de esta primera estructura de microinterruptor es que, a pesar de que efectivamente el componente Phase Loss Sensing permitiría la detección del islanding por la propia constitución física de la placa cuando se produjese un desequilibrio de tensión muy brusco o una pérdida de alguna de las fases, este modelo avanzado de placa que lo contiene es adecuado para instalaciones de tipo comercial con factor de potencia cercano a la unidad, pero no lo es de ninguna manera para actuar como elemento de disparo de los SCR del microinterruptor de la microrred UW.

3.5.2 MVBT6-1

Una vez comprobado que la placa que se encuentra instalada en el microinterruptor no es válida para la aplicación que se pretende, es necesario sustituirla. El nuevo modelo elegido es el MVBT6-1 de la casa comercial ENERPRO.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

Esta placa de disparo es mucho más sencilla que la anterior conceptualmente. En vez de tres transformadores de pulsos, uno para cada pareja de tiristores, cuenta con seis de ellos. Cada pareja de transformadores irá asociada a una de las ramas del puente de tiristores, de manera que cada vez que haya señal en la entrada, todos los transformadores estarán emitiendo pulsos de forma continua. Así se asegura que en cada rama siempre hay al menos un tiristor conduciendo, que será aquel que se encuentre en ese instante polarizado en sentido directo.

La placa recibe a la entrada una señal por cable coaxial o por fibra óptica y la convierte en un tren de pulsos de frecuencia 384 veces superior a la frecuencia fundamental de la alimentación (en este caso 23kHz para 60Hz).

Los primeros resultados obtenidos en la conexión en paralelo de las dos redes y la carga RLC muestran claramente la diferencia con la utilización del modelo MVB6-1. Estos resultados se observan en la figura 20:

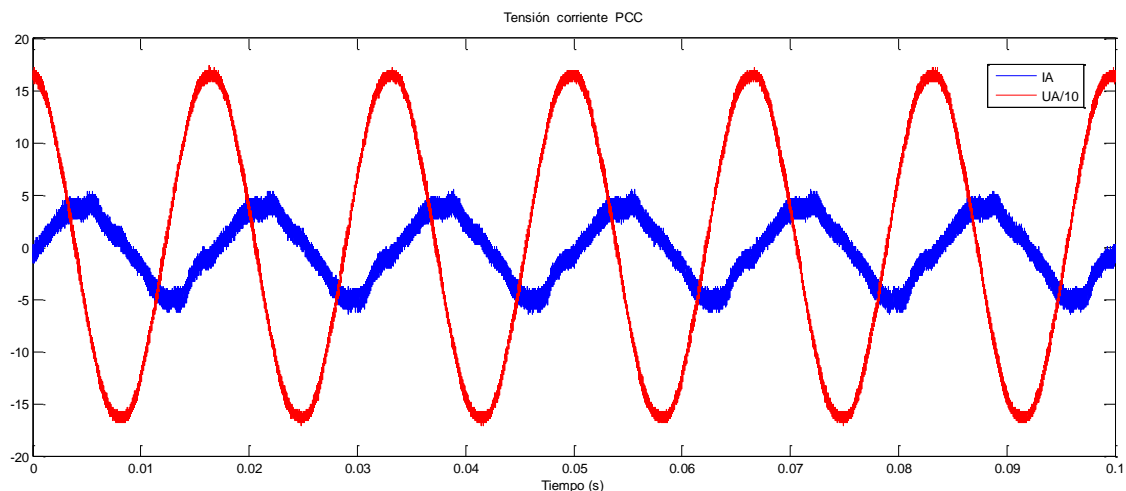


Fig. 20. Tensión y corriente en la fase A

Como se puede observar en la Fig. 20. la forma de onda de la corriente muestra que, con esta placa, sí se puede conseguir que en todo momento al menos uno de los tiristores de cada rama se encuentre en conducción y la potencia pueda fluir en ambos sentidos. Así mismo se puede apreciar la distorsión de la forma senoidal de la corriente debida, principalmente, a los armónicos introducidos por el inversor de la microfuelle y a los armónicos que introducen los condensadores que forman parte de la carga paralelo RLC.

5.2 Nuevo diseño del microinterruptor UW

Una vez justificada a lo largo del capítulo la necesidad de introducir cambios en la configuración inicial del microinterruptor para que pueda servir como elemento que cumpla con la función de "islanding responsibility" se resumen de forma concreta estos cambios sobre la nueva imagen de la figura 21:

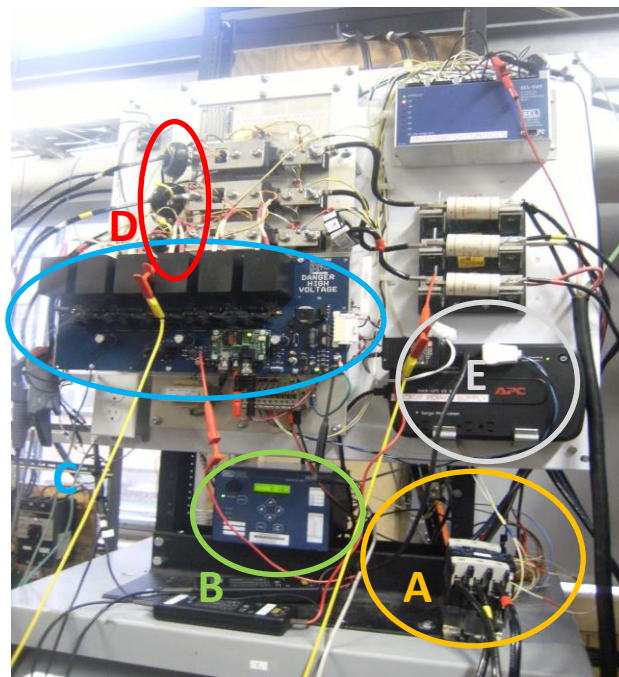


Fig. 21. Imagen del nuevo microinterruptor de la microrred UW

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

A - Instalación de un contactor y de un interruptor para la simulación en el sistema de la condición de islanding. El contactor actúa como elemento que sirve para la notificación de la pérdida de red a los relés.

B - Instalación del sistema de medición avanzada SEL-734P para medida y monitorización de armónicos y ajuste del umbral de disparo por armónicos que envíe la señal de desconexión de la microrred al relé SEL-547.

C - Construcción de la base acrílica y montaje de la nueva placa MTVB6-1 para disparo de los tiristores del microinterruptor.

D - Instalación de los transformadores de intensidad con relación 100/5 para la medida de corrientes en el relé SEL - 734P.

E - Sustitución de los fusibles de potencia.

4- ANÁLISIS DE ARMÓNICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE IDMs

4.1 Los armónicos como medida de detección del islanding

Como se ha justificado en el capítulo 2, los métodos de detección de islanding pasivos de tensión y frecuencia, tales como los de sobre y subfrecuencia y sobre y subtensión presentan dificultades en el caso de que la potencia que alimenta la carga provenga exclusivamente de la microrred. En este caso y ante una eventual situación de islanding, las variaciones de tensión y frecuencia en el punto de conexión común no son suficientes para que los controles pasivos del microinterruptor actúen.

Como se ha podido comprobar en las experiencias realizadas en la microrred de la Universidad de Wisconsin-Madison, es cierto que los cambios de tensión o de frecuencia no son indicadores fiables para el análisis del islanding. Por ello se deben buscar otros indicadores más precisos para los métodos de detección, tales como los niveles de armónicos en el PCC o el estudio de las impedancias armónicas y sus diferencias cuando el sistema está conectado a la red o cuando se encuentra en situación de islanding. El análisis de estos niveles detectados en el punto de conexión común servirá para la identificación de los armónicos de interés a la hora de establecer un nuevo método pasivo de detección de islanding que se pueda implementar en el microinterruptor.

4.2 La carga RLC. Cálculo, construcción y ensayos

Para la ejecución del ensayo de verificación del comportamiento de la instalación ante una situación de islanding inintencionado como se recoge el

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

el IEEE 1547, es necesario el cálculo y la construcción la carga RLC situada en paralelo con las redes, según se muestra en la figura 3.

Mediante la aplicación de las ecuaciones (1) y (2), se hace la estimación inicial del valor que deben tener los parámetros de la carga, si se considera que la potencia de la misma es 1 kW y que el factor de calidad es 2.5. Estos valores son orientativos ya que no se especifica ningún valor para la potencia de la carga, de la cual depende el resto de los parámetros. En este caso la carga se construye específicamente para la prueba de laboratorio por lo que el valor de la potencia sólo estaría limitado por la capacidad del inversor de la microfuentes y el factor de calidad puede seleccionarse según se estime oportuno.

Como la inductancia real y los condensadores que se utilizan para la construcción de la carga no están equilibrados, buscando la máxima igualdad posible entre fases se toman datos concretos de sus valores con el medidor RLC a fin de conectar la inductancia mayor con la capacitancia menor y viceversa. Con esta metodología se ajustan las tres ramas del circuito con los valores mostrados a continuación. Dado que la resonancia del circuito no depende de la resistencia, se adecúan inicialmente los valores de L y C para cada una de las fases, y la resistencia se añadirá en paralelo como paso final.

$$C1=250 \mu F \text{-----} L1=20.97 \text{ mH}$$

$$C2=249 \mu F \text{-----} L2=22.064 \text{ mH}$$

$$C3=248 \mu F \text{-----} L3=22.4 \text{ mH}$$

En la figura se observa el estudio de resonancia para esta primera aproximación. En azul se muestra la tensión de una de las fases y sobre ella, la frecuencia de la oscilación una vez que cesa la excitación del circuito.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

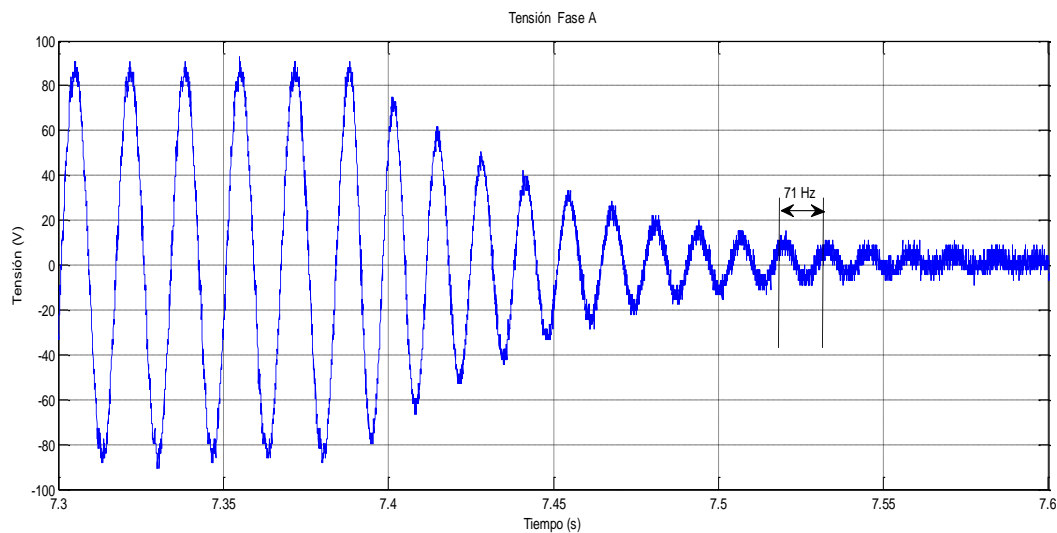


Fig. 22. Tensión de la fase A en el PCC para el ajuste teórico de la carga

Como se puede apreciar y dados los posibles errores ligados a la medida de las capacidades y las inductancias, la frecuencia de resonancia es mucho mayor que la que se esperaba según el cálculo teórico, es decir, de unos 71 Hz. Sobre ese valor inicial se realiza el ajuste experimental en carga hasta que la frecuencia de resonancia llega a los 60 Hz deseados. Este ajuste consiste en minimizar la corriente que entra a la rama LC. De forma teórica se sabe que si el circuito es oscilante, las energías almacenadas en el condensador y en la bobina deben ser iguales y la corriente, mínima. Esa corriente entrante a la rama nunca será efectivamente cero debido a la componente resistiva de la inductancia. En la figura 23 se observa cómo la frecuencia de oscilación es adecuada para los valores finales estimados:

$$C1=252.63 \mu\text{F} \text{-----} L1=22.901 \text{ mH}$$

$$C2=253.95 \mu\text{F} \text{-----} L2=22.719 \text{ mH}$$

$$C3=254.92 \mu\text{F} \text{-----} L3=21.467 \text{ mH}$$

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

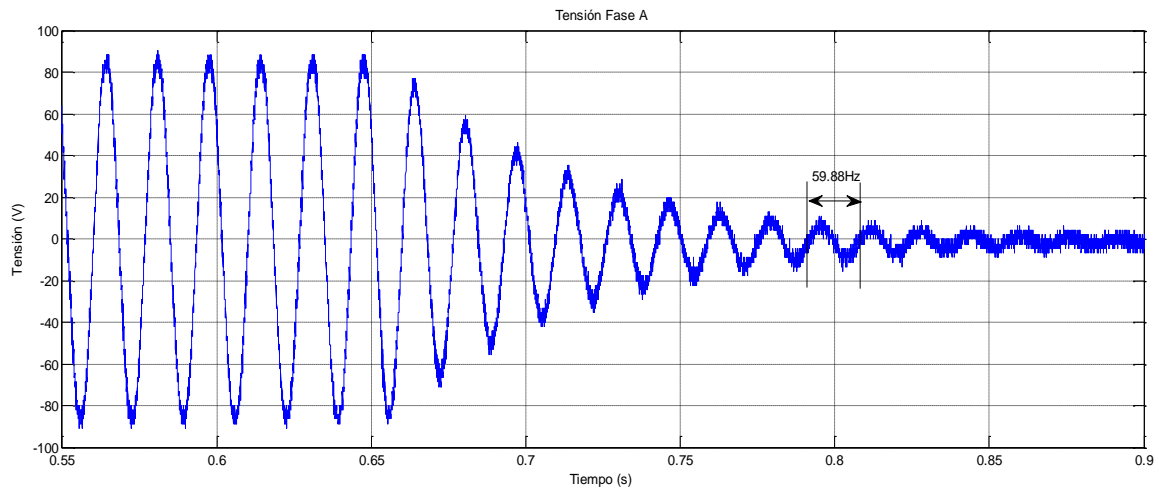


Fig. 23 Tensión de la fase A en el PCC para ajuste experimental de la carga

En base a esos valores queda construida la carga RLC que se colocará en paralelo con las redes para la reproducción del ensayo establecido en la normativa IEEE 1547. La figura 24 muestra la carga en la instalación del laboratorio.

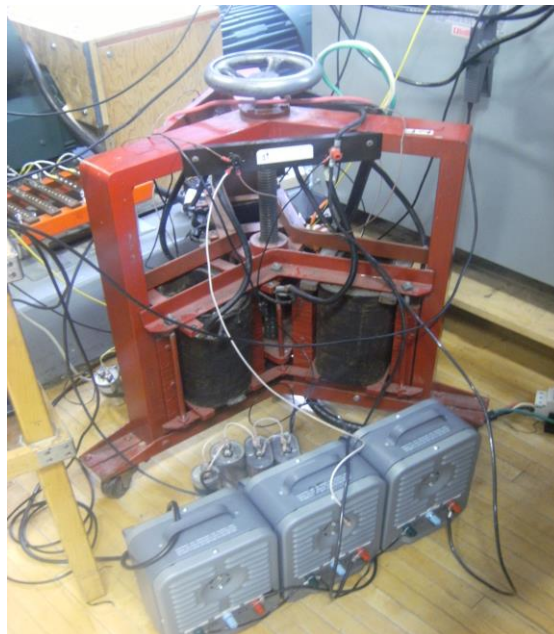


Fig. 24. Carga RLC para la reproducción del ensayo IEEE 1547

4.3 Medidas experimentales de armónicos en el PCC en el circuito de ensayo IEEE 1547

Para realizar un análisis de armónicos con suficiente nivel de detalle se desarrollan una serie de experimentos en los que la microrred, la red principal y la carga RLC están conectadas en paralelo tal como se muestra en la figura 25. La microrred para las pruebas estará compuesta por una de las microfuentes en paralelo con una de las cargas. El objetivo es el estudio del nivel de armónicos presentes en el PCC para definir los umbrales de actuación de las protecciones según las exigencias del IEEE 1547. Como objetivo secundario se realiza el cálculo de las impedancias armónicas para cada uno de los escenarios de interés, a fin de que puedan ser utilizadas posteriormente en el planteamiento de nuevos métodos de detección de islanding en la microrred.

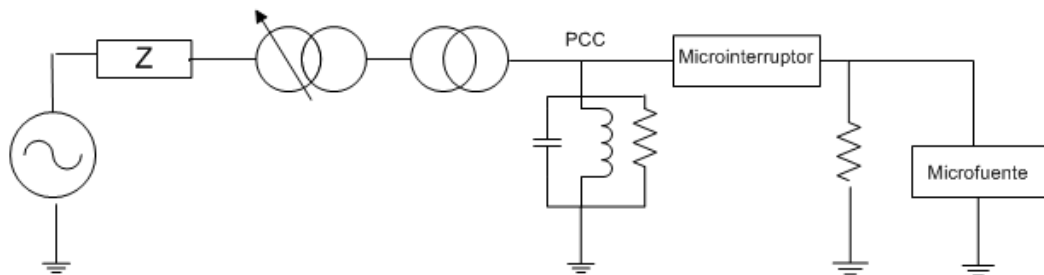


Fig. 25. Diagrama de bloques de la instalación laboratorio con la carga RLC conectada en el PCC para la medida de armónicos

Estas experiencias se han realizado para 5 escenarios distintos, dependiendo de la dirección del flujo de potencia existente entre la microrred y la red principal. Con estos cinco casos se cubren todas las posibles posibilidades de funcionamiento del conjunto. Esto supone una extensión a lo que se recoge en el IEEE 1547, para el que sólo está definido el sentido de

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

flujo de potencia desde la red principal hacia la microrred. El criterio de signos utilizado en los test de laboratorio para la potencia activa se muestran en la figura 26:

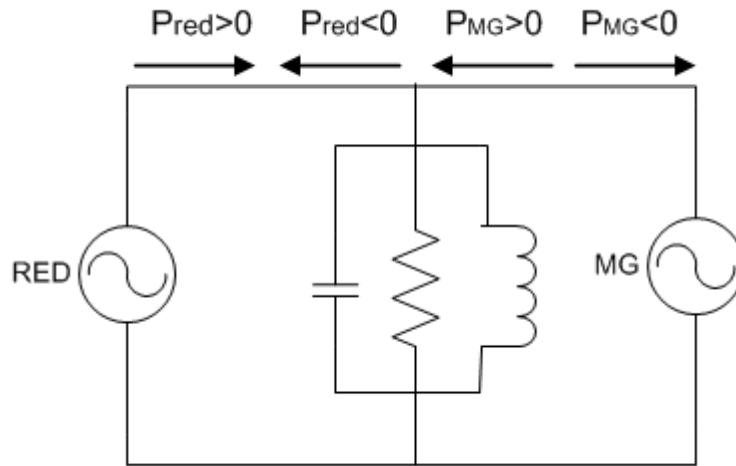


Fig. 26. Criterio de signos para las pruebas de laboratorio

Las medidas de armónicos se han registrado hasta orden 31, pero por simplicidad sólo se mostrarán los valores numéricos de los primeros armónicos hasta orden 15, por ser los de mayor interés. Todos los armónicos aparecen medidos y representados en valor en tanto por ciento sobre el armónico fundamental. Así mismo se representan exclusivamente las medidas para la fase A aunque se hayan registrado también en las otras dos fases. Especial interés cobra el caso 3, donde por parte de la red no se está aportando potencia a la carga, es decir, que el sistema se encuentra en la situación de "islanding". En cada uno de los casos se establece un análisis comparativo entre el nivel de armónicos detectado en la tensión y en la corriente cuando el sistema está funcionando correctamente frente al nivel de armónicos que se detecta cuando se produce la desconexión de la red y el sistema se queda operando en situación de islanding. Para la medida y

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

adquisición de datos en los siguientes caso se han utilizado dos medidores Fluke 41B y el relé 734P. Uno de ellos toma las variables en el lado de la red y el otro en el lado de la microrred, a ambos lados del microinterruptor. Los valores de potencia en kW mostrados son por fase.

- Escenario 1

PMG=0.67kW

PG=-0.19KW

En este primer caso, la potencia de la carga RLC proviene de la alimentación de la microrred. La carga RLC tiene una potencia por fase de unos 400W. Esto supone que en esta situación, hay un excedente de energía que fluye desde la microrred hasta la red. La microrred se encuentra en todo momento exportando potencia y la red importándola.

Orden del armónico	%V_con_red	%V_sin_red	Orden del armónico	%I_con_red	I%_sin_red
1	100	99,95	1	98,35	90,9
2	0,07	0,84	2	9,78	3,33
3	0,23	1,23	3	9,72	8,98
4	0,05	1,13	4	2,78	11,37
5	0,78	3,04	5	7,83	37,88
6	0,03	0,44	6	2,11	6,25
7	0,78	0,3	7	5,68	4,99
8	0,04	0,06	8	1,08	0,96
9	0,03	0,12	9	0,45	2,56
10	0,01	0,04	10	0,35	0,86
11	0,96	0,03	11	3,89	1,34
12	0,03	0,07	12	0,41	1,76
13	0,66	0,06	13	2,86	1,91
14	0,03	0,01	14	0,15	0,3
15	0,09	0,02	15	0,52	0,58

Tabla 4. Medidas de armónicos de tensión y corriente para el escenario 1

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

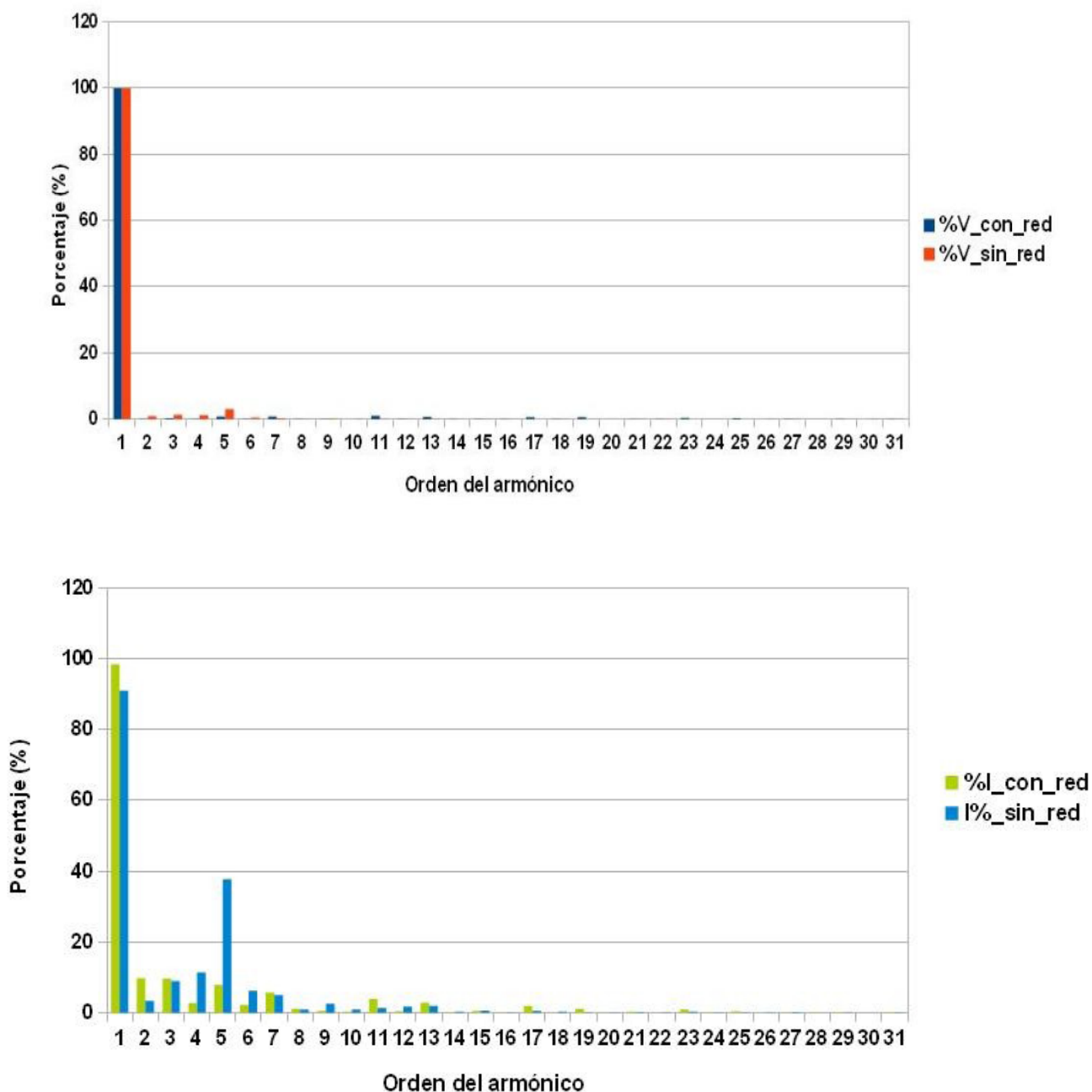


Fig. 27 Representación de los niveles de armónicos de tensión y corriente en el PCC con y sin la red principal conectada para el escenario 1.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 2

PMG=0.11 kW

PG=0.38 kW

En la segunda situación propuesta, la potencia inyectada por la microrred es mucho menor. El resto de la potencia necesaria para alimentar la carga RLC proviene de la red hasta llegar a los 0.4kW por fase de la carga. La microrred exporta potencia y la red también.

Orden_armónico	%V_con_red	%V_sin_red	Orden_armónico	%I_con_red	%I_sin_red
1	99,99	99,94	1	87,83	90,85
2	0,05	0,85	2	22,81	3,27
3	0,25	1,26	3	7,22	8,94
4	0,08	1,18	4	6,39	11,62
5	0,74	3,06	5	34,09	38,03
6	0,07	0,39	6	9	6,36
7	0,76	0,35	7	12,03	5,06
8	0,07	0,09	8	1,58	0,99
9	0,03	0,15	9	3,88	2,59
10	0,07	0,08	10	1,5	0,94
11	0,96	0,07	11	10,13	1,26
12	0,04	0,11	12	0,4	1,82
13	0,69	0,14	13	9,98	1,98
14	0,07	0,01	14	0,46	0,3
15	0,08	0,04	15	0,95	0,59

Tabla 5. Medidas de armónicos de tensión en el PCC para el caso 2

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

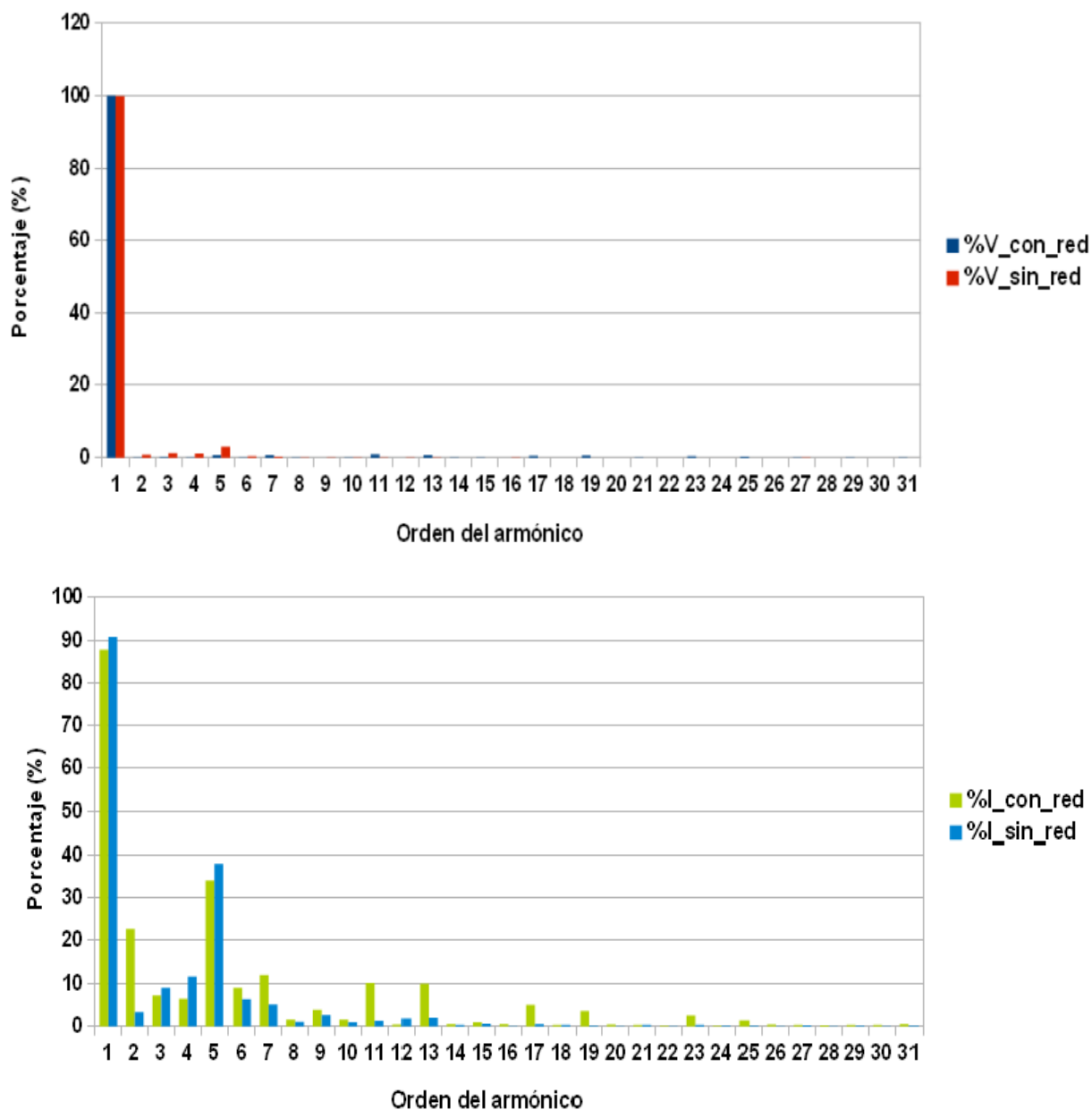


Fig. 28. Representación de los niveles de armónicos de tensión y corriente en el PCC con y sin la red principal conectada para el escenario 2.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 3

PG=0.02 kW

PMG=0.48 kW

En este tercer caso toda la potencia de la carga RLC proviene de la microrred. Es la situación definida anteriormente como "istmo" en la que los métodos tradicionales presentan dificultad para la detección de la situación de islanding. Según lo establecido en el IEEE 1547, para la realización de esta prueba la corriente inyectada desde la red hacia la rama RLC debe ser inferior al 2% de la corriente nominal de la carga.

Orden del armónico	%V_con_red	%V_sin_red	Orden del armónico	%I_con_red	%I_sin_red
1	99,97	99,93	1	97,85	90,74
2	0,13	0,92	2	11,82	3,26
3	0,3	1,38	3	10,65	8,89
4	0,01	1,29	4	3,33	11,53
5	0,72	3,54	5	8,94	38,29
6	0,03	0,55	6	2,58	6,31
7	0,63	0,4	7	5,94	5,04
8	0,01	0,1	8	1	1,02
9	0,06	0,14	9	0,68	2,62
10	0,01	0,05	10	0,24	0,9
11	0,65	0,07	11	4,54	1,25
12	0,02	0,06	12	0,43	1,75
13	0,5	0,1	13	3,55	1,92
14	0,03	0,02	14	0,1	0,27
15	0,09	0,05	15	0,35	0,58

Tabla 6. Medidas de armónicos de tensión y de corriente en el PCC para el escenario 3

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

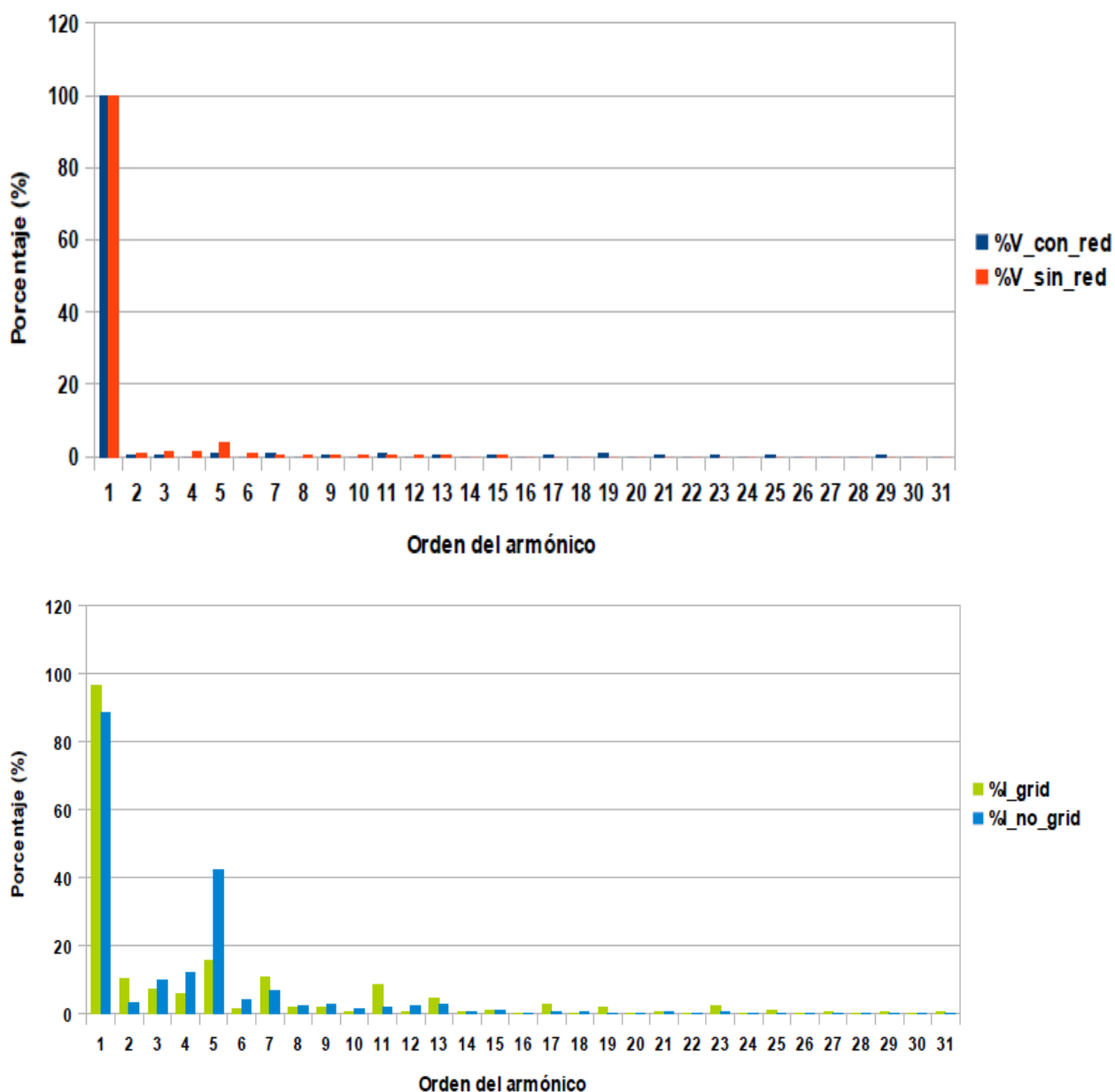


Fig. 29. Representación de los niveles de armónicos de tensión y corriente en el PCC con y sin la red principal conectada para el escenario 3.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 4

PMG=-0.48 kW

PG=0.97 kW

En la situación planteada en el caso 4, la red suministra cerca de 1kW de potencia, por lo que el excedente debe ser absorbido desde la microrred.

Orden del armónico	%V_con_red	%V_sin_red	Orden del armónico	%I_con_red	%I_sin_red
1	99,95	99,93	1	97,47	90,41
2	0,06	0,85	2	5,18	3,29
3	0,23	1,25	3	16,89	8,86
4	0,05	1,2	4	1,93	11,84
5	0,61	3,12	5	10,95	38,78
6	0,03	0,45	6	0,66	6,52
7	0,67	0,32	7	3,56	5,19
8	0,01	0,07	8	0,53	1,05
9	0,04	0,12	9	3,23	2,7
10	0,03	0,04	10	0,41	1,07
11	0,89	0,03	11	3,89	1,1
12	0,01	0,1	12	0,2	1,88
13	0,67	0,07	13	2,45	2,03
14	0,03	0,01	14	0,21	0,28
15	0,08	0	15	0,65	0,5

Tabla 7. Medidas de armónicos de tensión en el PCC para el caso 4

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

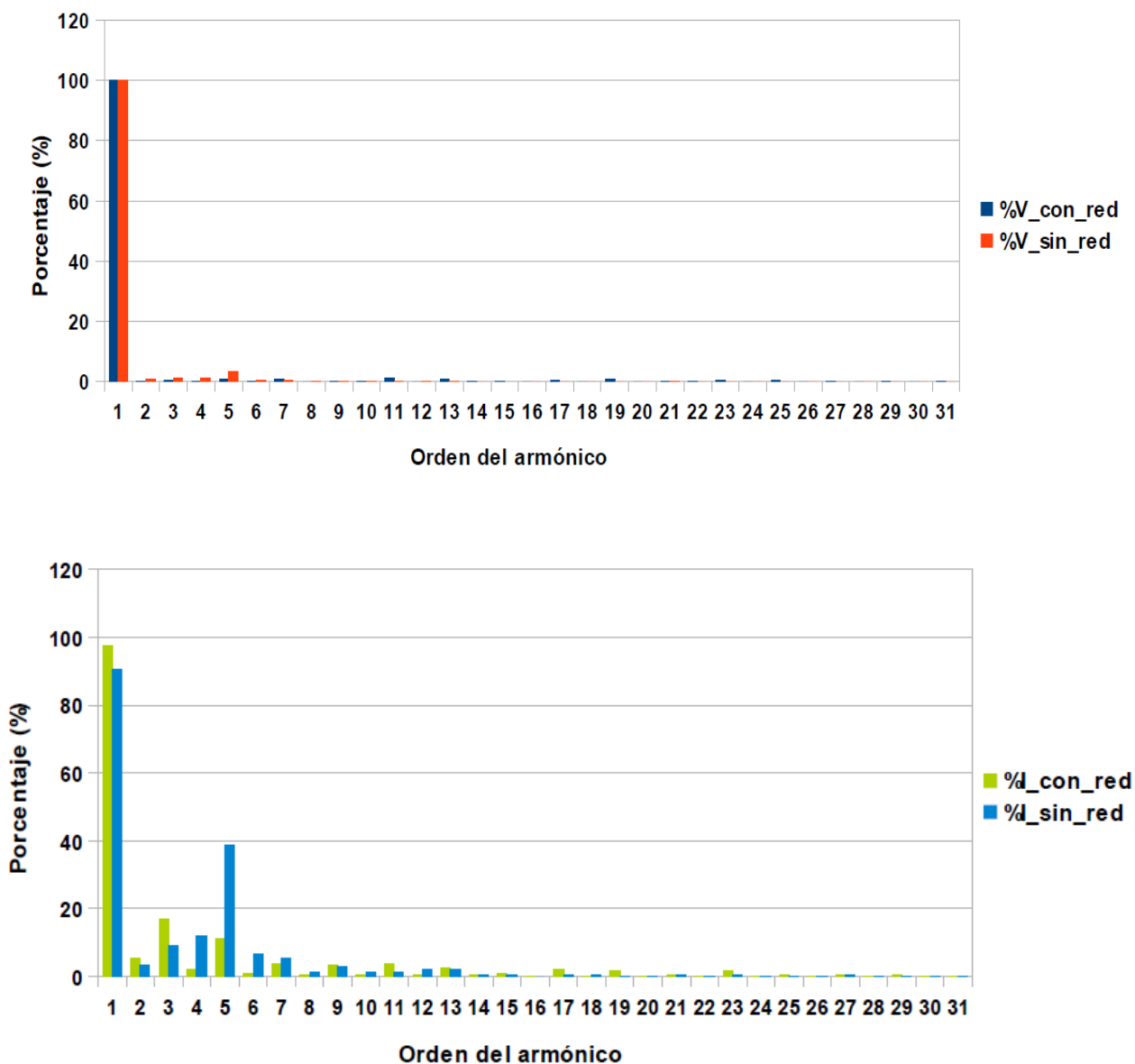


Fig. 30. Representación de los niveles de armónicos en el PCC con y sin la red principal conectada para el caso 4.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 5

PMG=-1.06W

PG=0.48 kW

En este último caso de prueba, la red alimenta por completo la carga en paralelo RLC, de manera que la microrred está conectada pero sin ceder ni absorber potencia.

Orden del armónico	%V_con_red	%V_sin_red	Orden del armónico	%I_con_red	%I_sin_red
1	99,98	99,9	1	48,06	89,77
2	0,05	0,91	2	32,23	3,54
3	0,24	1,09	3	16,04	8,34
4	0,03	1,42	4	17,47	14
5	0,69	3,13	5	56,97	39,82
6	0,02	0,28	6	17,97	4,51
7	0,68	0,22	7	36,08	3,89
8	0,01	0,1	8	6,35	1,9
9	0,03	0,18	9	1,93	4,62
10	0,03	0,01	10	2,57	0,39
11	0,81	0,1	11	23,46	2,75
12	0,01	0,05	12	2,92	1,62
13	0,65	0,01	13	15,9	0,1
14	0,05	0,03	14	1,21	1,07
15	0,08	0,03	15	3,28	1,13

Tabla 8. Medidas de armónicos de tensión en el PCC para el caso 5

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

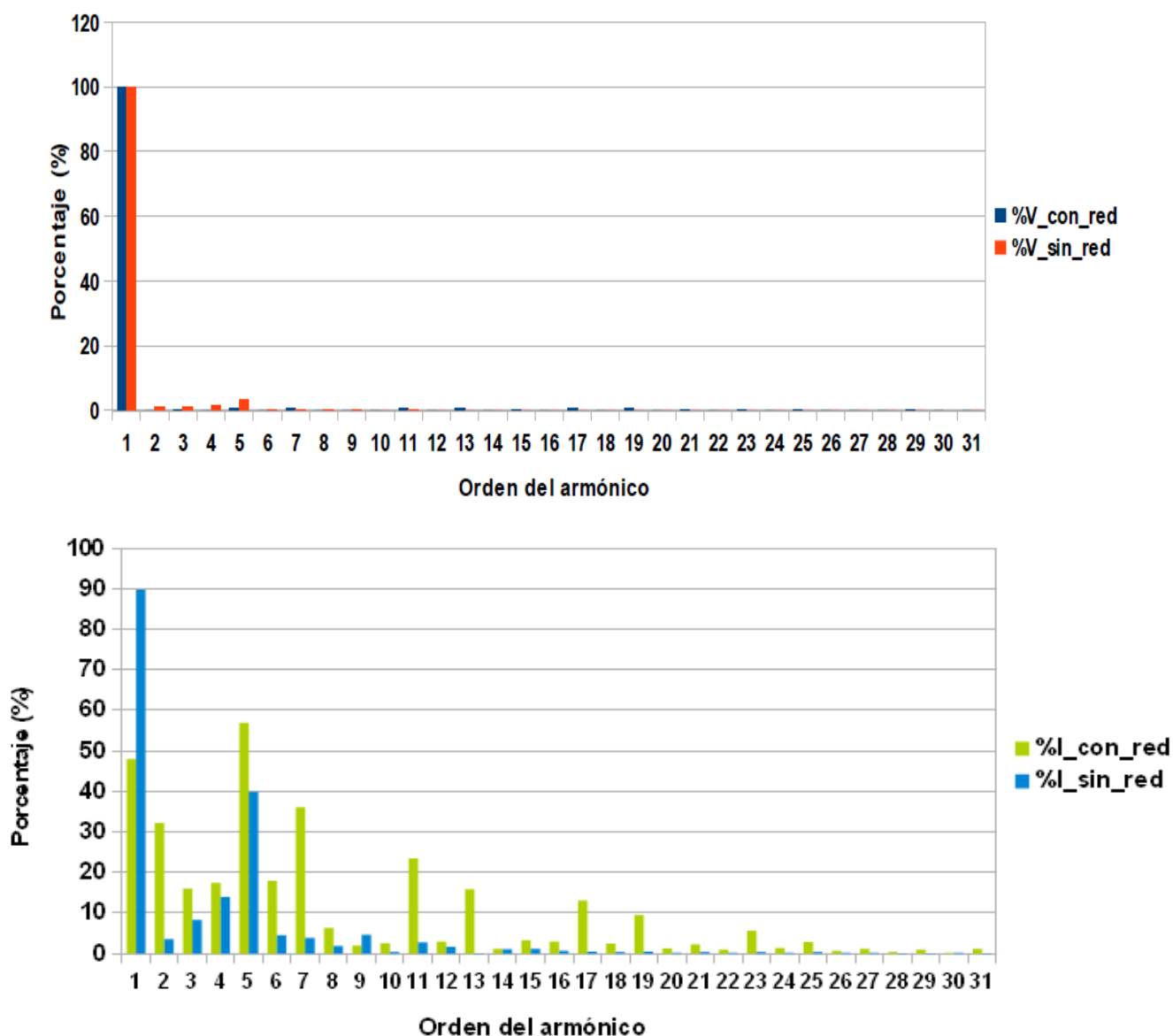


Fig. 31. Representación de los niveles de armónicos de tensión y corriente en el PCC con y sin la red principal conectada para el escenario 5.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

4.4 Cálculo de las impedancias armónicas

- Escenario 1

Orden del armónico	$ Z_h (\Omega)_{con_red}$	αZ_{con_red}	$ Z_h (\Omega)_{sin_red}$	αZ_{sin_red}
1	17,4933135215	-33	33,7426900585	7
2	0,1194029851	56	7,4615384615	-75
3	0,4029850746	-4	4,1764705882	269
4	0,3157894737	112	3,023255814	-81
5	1,6851851852	-253	2,4545454545	-82
6	0,2857142857	57	2,125	-82
7	2,3333333333	-78	1,8421052632	-77
8	0,7142857143	61	1,75	290
9	1,3333333333	60	1,3	-93
10	1	-89	1,6666666667	-91
11	4,1851851852	186	0,6	-45
12	1,3333333333	20	1,1428571429	-85
13	3,85	268	1	-80
14	3	-237	1	228
15	2,75	-124	1	-97

Tabla 9. Medidas de impedancias armónicas para el escenario 1

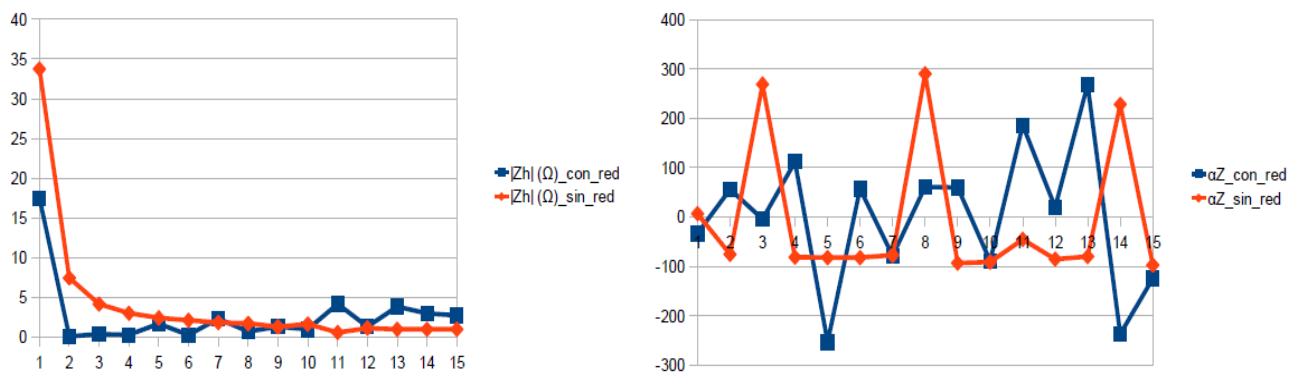


Fig. 32. Impedancias armónicas en módulo y fase para el escenario 1.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 2

Orden del armónico	$ Z_h (\Omega)_{con_red}$	αZ_{con_red}	$ Z_h (\Omega)_{sin_red}$	αZ_{sin_red}
1	61,6178010471	-60	33,5406976744	8
2	0,12	17	8,1666666667	-78
3	1,875	34	4,2647058824	270
4	0,6428571429	83	3,0909090909	-82
5	1,1891891892	-253	2,4513888889	-80
6	0,4	25	1,875	-81
7	3,4230769231	-93	2,1578947368	-76
8	2,6666666667	175	2,75	277
9	0,375	85	1,7	-107
10	2,6666666667	-277	2,25	-95
11	5,1363636364	184	1,6	18
12	5	79	1,8571428571	-92
13	3,6818181818	274	2,2857142857	-70
14	8	-208	2	42
15	4,5	-94	2,5	-18

Tabla 10. Medidas de impedancias armónicas para el escenario 2

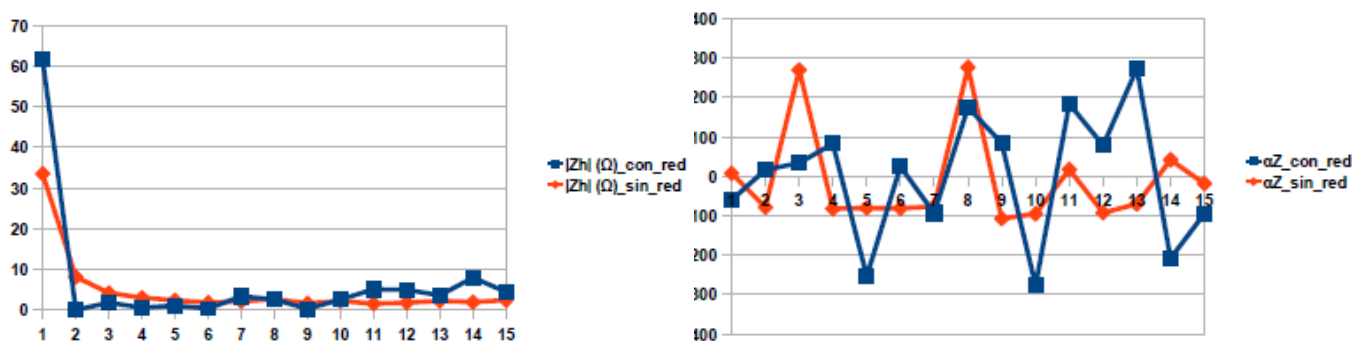


Fig. 33. Impedancias armónicas en módulo y fase para el escenario 2.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 3

Orden del armónico	$ Z_h (\Omega)_{con_red}$	αZ_{con_red}	$ Z_h (\Omega)_{sin_red}$	αZ_{sin_red}
1	35,905775076	9	33,9914040115	6
2	0,0857142857	157	8,2307692308	-80
3	1,5	55	4,2894736842	270
4	0,25	109	3,2291666667	-83
5	1,6037735849	-256	2,5329341317	-82
6	0,2	-48	4,125	-82
7	1,9444444444	-98	1,8148148148	-80
8	0,1666666667	-267	1,375	273
9	1,1666666667	71	1,6363636364	-82
10	0,5	67	1,2	-88
11	3,3214285714	219	1,3333333333	-81
12	2	-52	1,125	-74
13	4,5625	263	1,1	-74
14	1	-204	2	244
15	4,3333333333	2	0,75	-47

Tabla 11 Medidas de impedancias armónicas para el escenario 3

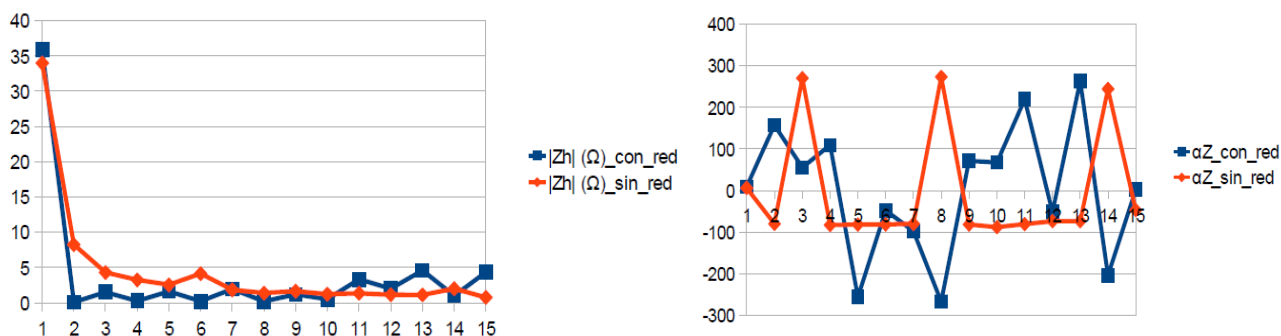


Fig. 34. Impedancias armónicas en módulo y fase para el escenario 3.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 4

Orden del armónico	$ Z_h (\Omega)_{con_red}$	αZ_{con_red}	$ Z_h (\Omega)_{sin_red}$	αZ_{sin_red}
1	25,367965368	151	34,0265486726	8
2	0,28	220	8,1666666667	-79
3	0,3375	75	4,3636363636	265
4	0,6666666667	83	3,1363636364	-81
5	1,3653846154	-221	2,4827586207	-81
6	1,3333333333	-1	2,1666666667	-80
7	4,6470588235	-116	1,9473684211	-79
8	0,5	-291	2,25	285
9	0,3333333333	102	1,3	-88
10	1,5	22	1,25	-78
11	5,7777777778	213	1	-48
12	2	4	1,7142857143	-85
13	6,5833333333	255	1,125	-85
14	3	-171	2	104
15	3	-104	0	-109

Tabla 12. Medidas de impedancias armónicas para el escenario 4

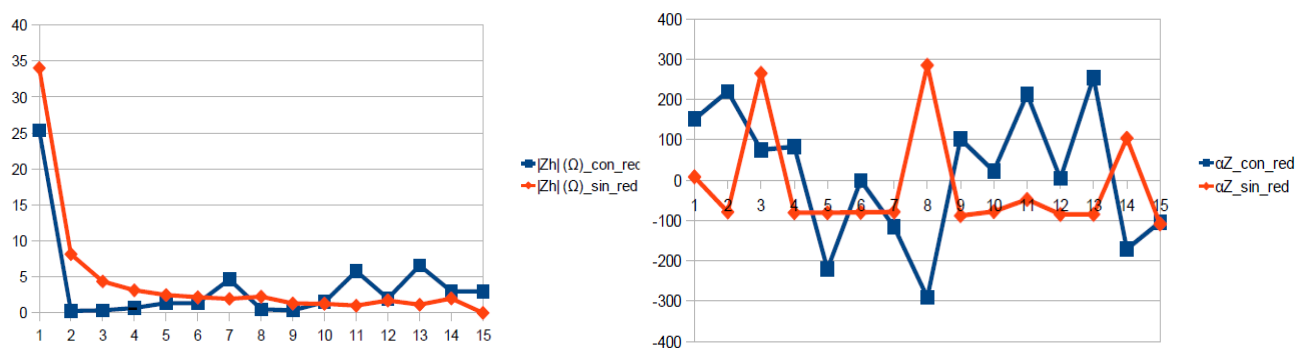


Fig. 35. Impedancias armónicas en módulo y fase para el escenario 4.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

- Escenario 5

Orden del armónico	$ Z_h (\Omega)_{con_red}$	αZ_{con_red}	$ Z_h (\Omega)_{sin_red}$	αZ_{sin_red}
1	469,6	94	527,9090909091	168
2	2,2173913043	16	52,5	-156
3	3	317	63,5	296
4	1,5882352941	-22	83	-156
5	1,6170212766	-294	364	185
6	1,5454545455	-22	33	-284
7	2,6666666667	-96	26	136
8	6,5	7	12	1
9	3,2	-81	210	-88
10	1,6666666667	-126	2	50
11	4,3636363636	200	120	-112
12	1	-45	6	29
13	5,1333333333	248	20	11
14	4	-135	40	-153
15	3	-133	40	42

Tabla 13. Medidas de impedancias armónicas para el escenario 5

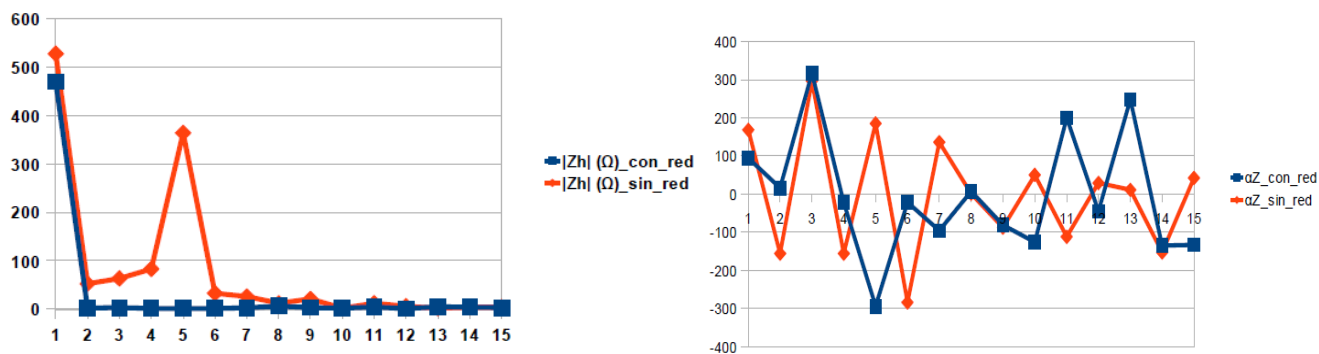


Fig. 36. Impedancias armónicas en módulo y fase para el escenario 5.

4.5. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se han expuesto los resultados experimentales de medida de armónicos en el punto de conexión común. Se han tomado medidas tanto de tensión como de corriente y se han calculado a partir de esos datos las impedancias para cada uno de los armónicos principales existentes en el sistema. Si bien en este trabajo sólo se utilizarán las medidas de tensión, se ha estimado conveniente el cálculo de las otras magnitudes ya que pueden servir como indicadores posteriores en nuevos métodos de detección de islanding que se quieran implementar.

Como se puede observar en las figuras 27-31 y en las correspondientes tablas, en todos los casos el patrón de comportamiento de la tensión armónica en el sistema es similar. Cuando se produce una situación de islanding, el nivel de tensión de 5º armónico existente en el PCC presenta una variación apreciable de su nivel y, en todos los casos, se sitúa por encima del 3%. No es un resultado que a simple vista resulte sorprendente. La gran mayoría de las fuentes de generación distribuida se conectan a los sistemas eléctricos por medio de convertidores. Si estos convertidores son de 6 pulsos, introducirán principalmente magnitudes de 5º y 7º armónico. Al desaparecer la red, los convertidores de las microfuentes son dominantes en el sistema lo que explica esa subida en los niveles de 5º armónico. La detección de las situaciones de islanding por medio de valores de armónicos siempre va ligada a la propia experiencia de la red. Es evidente que ante una situación de islanding los niveles de armónicos en el PCC variarán, pero no es tan claro la forma en que lo van a hacer. Depende especialmente de la cantidad de electrónica de potencia inserta en la microrred y de la polución armónica que provenga de la red principal. En el caso concreto de la UW-Madison, los niveles de 5º armónico son claramente superiores en caso de

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

islanding pero sin embargo, disminuyen los de 7°. Y este comportamiento no es extrapolable a otras microrredes.

La gran ventaja que se desprende del análisis de estos ensayos radica en que en la situación de itsmo, tan compleja para la detección del islanding por los métodos pasivos tradicionales, con amplias NDZs, es precisamente donde ese nivel de 5° armónico alcanza un valor más diferenciado con respecto a la situación de conexión de la red, lo que facilita el ajuste posterior de los relés para la detección y desconexión de la microrred.

En cuanto a las medidas de corriente, se observa una alta polución armónica. Esto se debe a la inyección de corriente distorsionada que proviene del inversor de la microfuelle así como de las no linealidades inherentes a la carga RLC y a los transformadores presentes tanto en el lado de la microrred como el lado de red.

Para el caso de impedancias el análisis el algo más complejo. El comportamiento en los cuatro primeros casos es similar. Existe un punto claro de corte entre las impedancias en el caso de que la red se mantenga conectada o que el sistema quede en situación de islanding. En la situación en que el sistema funciona con normalidad, hay un predominio del valor de las impedancias a los armónicos más altos y se produce un cambio de tendencia ante la situación de islanding. En el escenario 5, al producirse islanding cambia completamente el patrón. La carga pasa a estar completamente alimentada por la microrred cuando toda la potencia provenía de la red antes del islanding. Esto se traduce en un cambio muy brusco de la impedancia del sistema vista desde el lado de la microrred.

Si bien estas diferencias plantean que no es posible un método basado en el cómputo de impedancias que sea válido para todos los escenarios posibles, no es descartable que en un futuro se pueda

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

implementar en la microrred un método basado en impedancias para la situación de istmo, confiando la actuación del sistema en el resto de escenarios a la actuación de otros IDMs (UOF, UOV).

5. MÉTODO PASIVO DE DETECCIÓN DE ISLANDING BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

5.1 Lógica del relé SEL-734P para detección de islanding

A partir de las conclusiones expuestas en el capítulo 4 sobre el patrón de comportamiento de la tensión de 5º armónico en los distintos escenarios de flujo de cargas y utilizando la nueva configuración del interruptor definida y justificada en el capítulo 3, se realiza la implementación en el relé SEL-734P del umbral de actuación necesario para la detección de la situación de islanding. La lógica de control adicional para el dispositivo aparece en la Fig.37 :

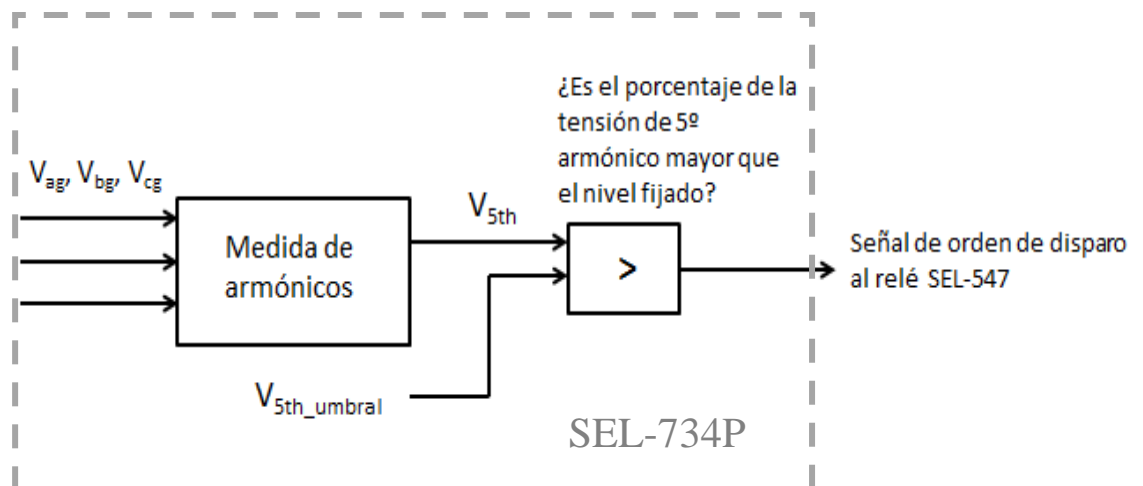


Fig. 37. Lógica del relé 734P

5.2 El sistema en situación de itmo. Ensayos

Con el nuevo ajuste del relé SEL-734P se realizan las pruebas de verificación del ensayo IEEE 1547 con el sistema en situación de istmo (escenario 3).

Se registran las formas de onda y los tiempos de actuación para diez experimentos distintos.

En todos los casos, el relé detecta el nivel de 5º armónico de tensión por encima del umbral y actúa para desconectar la microrred. En las figuras de las siguientes páginas se observan las formas de onda obtenidas de los registros de los relés. En la figura de la página 79 aparecen representadas las formas de onda registradas en el dispositivo SEL-734P.

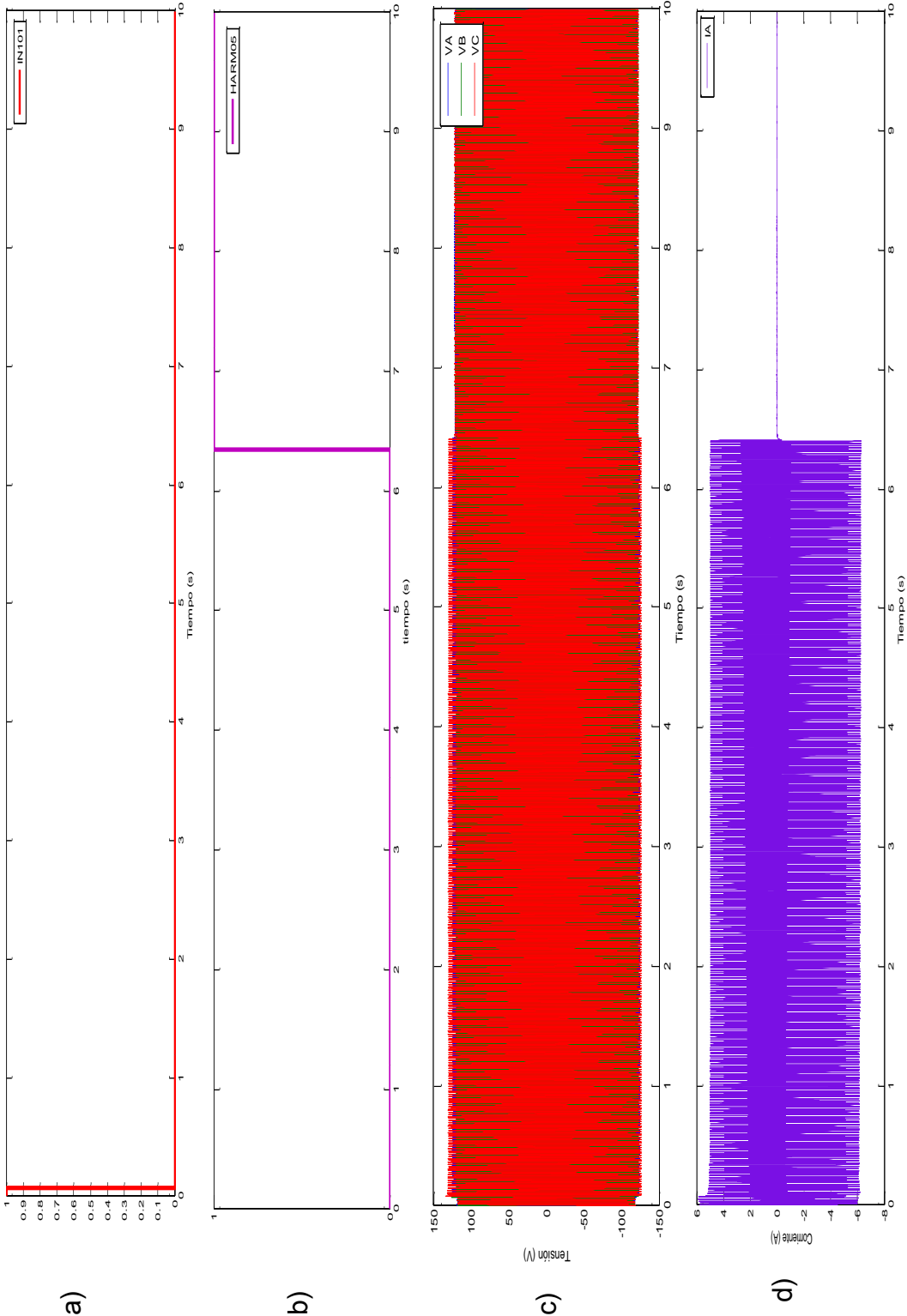
En a) se aprecia la señal que indica la pérdida de la red y el inicio de la situación de islanding. En b) se representa la señal digital que muestra la activación del relé por sobrepasar el nivel de 5º armónico. En c) se observan las tensiones en cada una de las fases y los desequilibrios que aparecen como consecuencia de las transiciones en las dos señales y en d) aparece representada la corriente de la fase A.

En la figura 38 de la página 80 se observa un detalle de la corriente y del cambio claro en los niveles de armónicos que se produce en el instante en que el sistema queda operando en situación de islanding.

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

SEL-734P



ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

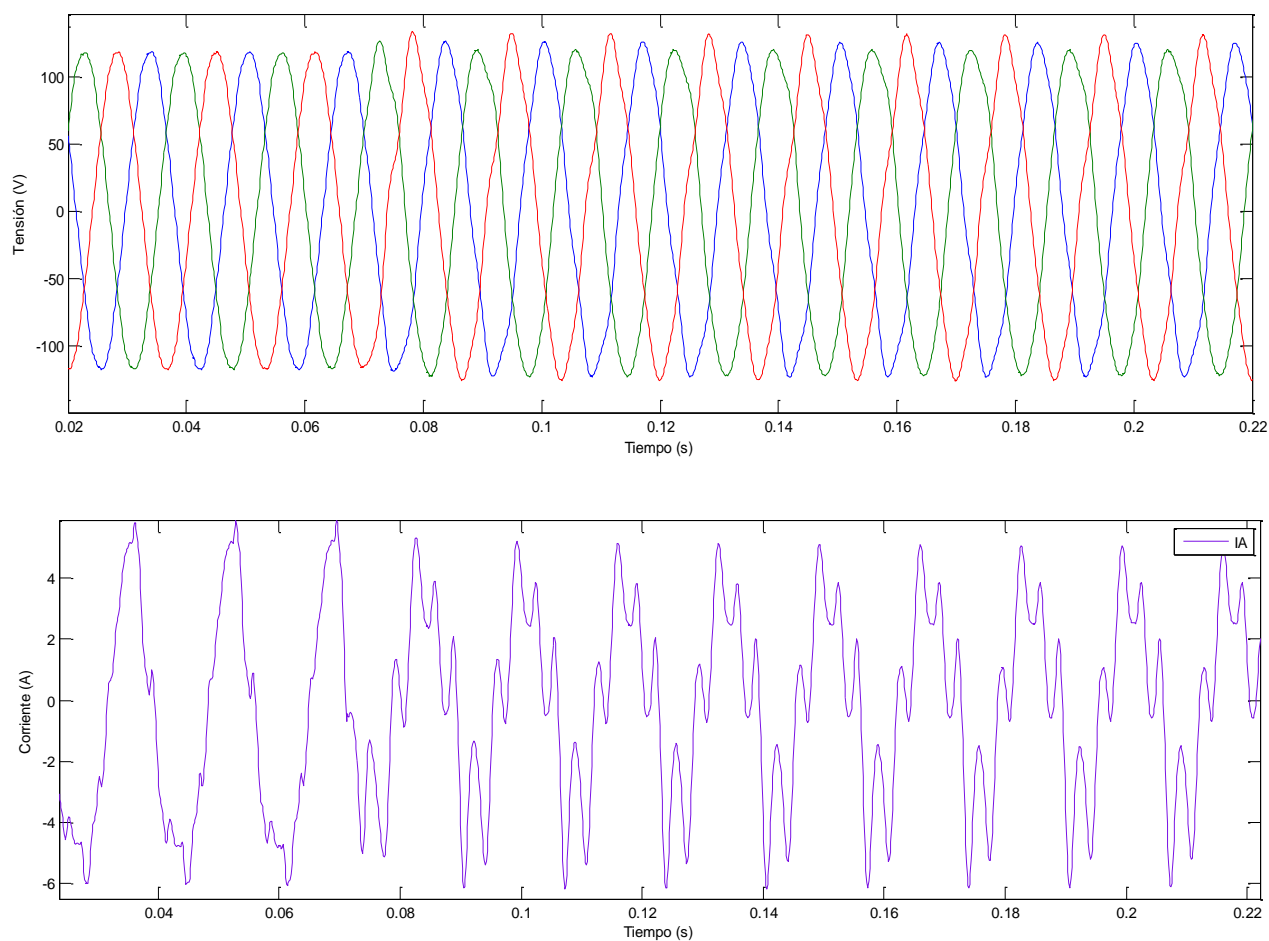


Fig. 38 Detalle de la transición entre el modo conectado a red y el modo aislado en las tensiones y la corriente de la fase A. Cambio en los armónicos.

SEL-547

El relé SEL-547 registra el momento desde el que recibe la señal de disparo desde el SEL-743P hasta que se inhiben los pulsos de los tiristores y la tensión se extingue en el PCC. En la figura 39 se representan las

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

tensiones de las tres fases desde el lado de red (VA,VB y VC), la tensión de la microrred (VS) y la corriente de la fase A que se inyecta desde la microrred hacia el punto de conexión común . Con estas gráficas es posible estimar el tiempo de actuación de la placa de disparo.

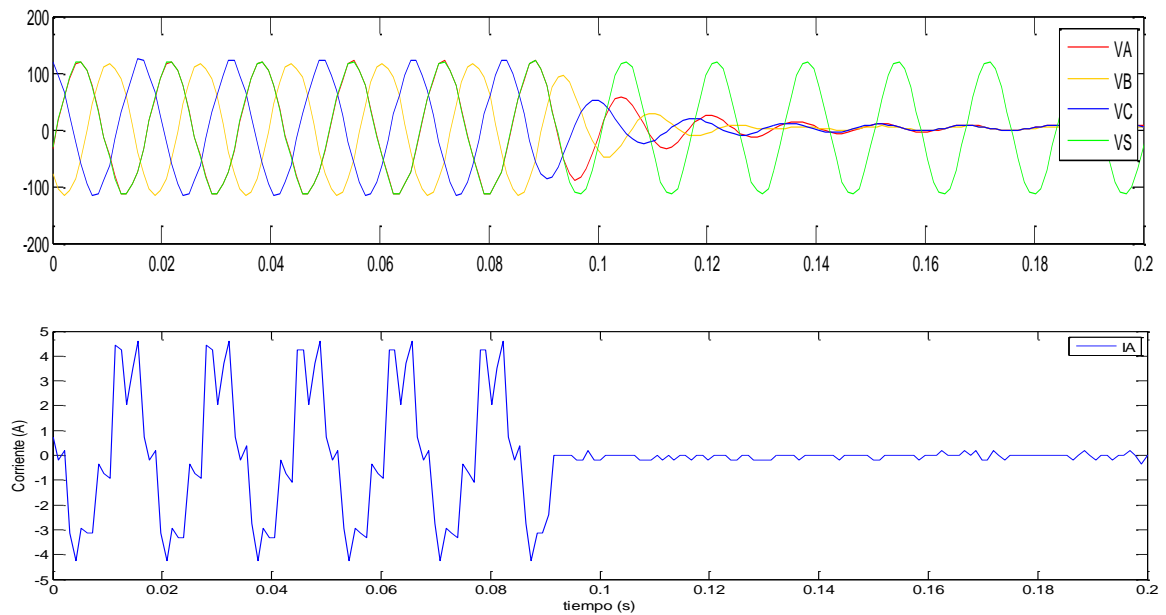


Fig. 39. Registro de tensiones y corriente en el relé SEL – 547

Para cada una de las diez experiencias realizadas se han medido los tiempos desde que se produce la situación de islanding hasta la completa desconexión de la microrred. Esos tiempos aparecen recogidos en la tabla 14.

Test	Tiempo(s)
1	4.313
2	7.436
3	4.386
4	6.086
5	6.859
6	4.004
7	4.079
8	5.776
9	5.001
10	4.087

Tabla 14. Tiempos de actuación del método para cada una de las experiencias

5.3 Análisis de resultados

A partir de los resultados observados en el apartado 5.2 se puede determinar que el ajuste propuesto para el nivel de tensión de 5º armónico es el adecuado ya que el relé ha disparado correctamente en cada una de las pruebas realizadas en la microrred experimental.

Si se observan los tiempos de actuación se aprecia a simple vista que son mucho mayores que el límite de 2s fijado por la normativa IEEE 1547. Esto se debe a la propia naturaleza del relé SEL-734P, que registra y actualiza las medidas de armónicos cada 4s. Si bien esto no resta validez al método propuesto, para el cumplimiento de la normativa sería necesario llevar a cabo una implementación posterior en hardware en la microrred.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En la actualidad se viene produciendo un incremento notable en el número de microrredes instaladas en los sistemas eléctricos de potencia. Este avance se debe principalmente a la versatilidad que presentan pudiendo funcionar tanto en modo conectado a red como en modo aislado. Se prevé que este auge siga en aumento debido a la aparición, hace unos meses, de la normativa IEEE 1547.4, que por primera vez regula los aspectos ligados a la integración de microrredes en los sistemas eléctricos. Las necesidades de seguridad, de suministro de calidad de potencia, de estabilidad y de control de los sistemas han llevado a un amplio desarrollo de los métodos de detección de islanding que, en caso de una pérdida de la red principal, sirvan para desconectar la microrred.

En este trabajo Fin de Máster se ha mostrado una idea general de la situación actual de las microrredes y de la normativa aplicable. Así mismo, se ha hecho un recorrido a través de los distintos métodos de detección de islanding y su clasificación y la posible extensión de los mismos al particular caso de las microrredes.

Para la aplicación y el estudio de estos conceptos se ha desarrollado un trabajo práctico en las instalaciones de la microrred experimental de la Universidad de Wisconsin-Madison. Este trabajo engloba varias tareas. La primera de ellas ha sido el estudio de la configuración inicial del interruptor y el establecimiento de un nuevo diseño para verificar las funciones de elemento de conexión entre la microrred y la red principal y dispositivo

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

responsable de la detección y actuación en caso de islanding. A continuación se han tomado medidas detalladas de los niveles de armónicos existentes en el PCC en funcionamiento normal y en situación de islanding. A partir de esas medidas se ha implementado en el microinterruptor un nuevo método pasivo de detección de islanding y se ha comprobado su adecuación al cumplimiento de la normativa IEEE 1547.

La novedad del trabajo presentado radica en que, por primera vez, se ha implementado en la microrred UW-Madison un método de detección de islanding desde el punto de vista del microinterruptor y no como viene siendo habitual en los sistemas de generación distribuida, desde la perspectiva de los inversores de las microfuentes.

Los resultados expuestos demuestran la validez del método si bien es necesario puntualizar que, debido a la velocidad de actualización de las medidas del SEL-743P, no es posible cumplir con los requisitos de tiempo de desconexión exigidos en la normativa IEEE 1547. Se deja para futuros trabajos en la microrred la implementación en hardware necesaria para cumplir con los requerimientos de la norma. Este fin puede incluir varias alternativas: la adquisición de un equipo más adecuado a la aplicación propuesta, la construcción de una carga adicional en el PCC resonante al armónico de interés o la medida de frecuencias por medio de la utilización de PLLs sintonizados a la frecuencia de 5º armónico.

REFERENCIAS

- [1] Barnes, M.; Kondoh, J.; Asano, H.; Oyarzabal, J.; Ventakaramanan, G.; Lasseter, R.; Hatziargyriou, N.; Green, T.; , "Real-World MicroGrids-An Overview," System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07. IEEE International Conference on, vol., no., pp.1-8, 16-18 April 2007
- [2] IEEE "IEEE Standard for Interconnecting distributed resources with electric power systems" IEEE Std. 1547, 2003
- [3] W. Xu, K. Mauch, and S. Martel, An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues for Canada, CANMET Energy Technology Centre-Varennnes, National Resources Canada, Rep. 2004-074(TR), Jul. 2004
- [4] Singam, B.; Hui, L.Y., "Assessing SMS and PJD Schemes of Anti-Islanding with Varying Quality Factor," Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International, pages: 196 - 201, 28-29 Nov. 2006
- [5] Mahat, P.; Zhe Chen; Bak-Jensen, B, "Review of islanding detection methods for distributed generation" Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 2743-2748, 2008
- [6] Stráth, N., "Islanding detection in power systems". Licentiate thesis, Dept of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, ISBN: 91-88934-42-X.2005
- [7] Lee, J., "Islanding detection methods for microgrids". Master thesis. Dept of Electrical & Computer Engineering. University of Wisconsin – Madison. Mayo 2011
- [8] Bahrani, B.; Karimi, H.; Iravani, R.; , "Nondetection Zone Assessment of an Active Islanding Detection Method and its Experimental Evaluation," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.26, no.2, pp.517-525, April 2011
- [9] Bhandari, R.; Gonzalez, S.; Ropp, M.E.; , "Investigation of two anti-islanding methods in the multi-inverter case," Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , vol., no., pp.1-7, 20-24 July 2008

ESTUDIO Y MEJORA DE UN MICROINTERRUPTOR E IMPLEMENTACIÓN DE UN IDM PASIVO BASADO EN LA MONITORIZACIÓN DE ARMÓNICOS

Julia Merino Fernández

[10] Cardenas, Alben; Agbossou, Kodjo; Doumbia, Mamadou L.; , "Performance evaluation of active anti-islanding scheme for multi-inverter DG systems," *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on* , vol., no., pp.218-221, 16-19 May 2010

[11] Lopes, L.A.C.; Yongzheng Zhang, "Islanding Detection Assessment of Multi-Inverter Systems With Active Frequency Drifting Methods," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.23, no.1, pp.480-486, Jan. 2008

[12] Mingyu Xue; Fangrui Liu; Yong Kang; Yu Zhang; , "Investigation of active islanding detection methods in multiple grid-connected converters," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International* , vol., no., pp.2151-2154, 17-20 May 2009

[13] Geng, H.; Xu, D.; Wu, B.; Yang, G., "Active Islanding Detection for Inverter-Based Distributed Generation Systems With Power Control Interface," *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1-10, July 2011

[14] G. Hernandez-Gonzalez; R. Iravani,, "Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.21, no.3, pp.1698-1705, July 2006

[15] Katiraei, F.; Iravani, M.R.; Lehn, P.W., "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.20, no.1, pp. 248- 257, Jan. 2005

[16] Zhihong Ye; Kolwalkar, A.; Yu Zhang; Pengwei Du; Reigh Walling; , "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.19, no.5, pp. 1171- 1176, Sept. 2004